



José Duarte Bonito Brasil

Licenciado em Engenharia Geológica

Prospecção, caracterização e avaliação de recursos de areias siliciosas para a indústria vidreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica

Orientador: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof.
Associado - FCT/UNL

Coorientador: Doutor José António Almeida, Prof. Associado -
FCT/UNL

Júri

Presidente: Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano, Prof. Auxiliar - FCT/UNL

Vogais: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa, Prof. Auxiliar - FCT/UNL

Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof. Associado - FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2018

Prospecção, caracterização e avaliação de recursos de areias siliciosas para a indústria vidreira.

Copyright © José Duarte Bonito Brasil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao professor Pedro Lamas pela disponibilidade e paciência demonstradas no esclarecimento de dúvidas e análise dos assuntos abordados e revisão de resultados dos trabalhos de campo bem como a boa disposição nos durante os dias de viagem para a prospeção sísmica.

Ao professor José Almeida, pela disponibilidade demonstrada e interesse nos resultados e discussão da Modelação Geológica.

Ao professor Joaquim Simão pelo esclarecimento das dúvidas acerca das análises químicas e mineralógicas e conversão dos teores dos elementos em óxidos.

Ao Engenheiro Alexandre Neves, da empresa *SACT, Lda.*; por todo o tempo e disponibilidade demonstrados durante os trabalhos de prospeção.

À professora Maria Pessoa, pela total disponibilidade para as análises com a espectroscopia de fluorescência de raio X (XRF).

Ao centro de investigação GeoBioTec por ter custeado uma análise com o equipamento *QEMSCAN* em Inglaterra (feita pela empresa Rocktype Ltd).

À empresa Midland Valley pelo acordo de licença académica que permitiu a utilização do software MOVE, na modelação geológica.

A todos os meus amigos e colegas, especialmente ao José Regueira e à Catarina Alves por ter sido uma enorme ajuda no campo e no decorrer dos ensaios. Obrigado a todos os que estiveram presentes ao longo destes anos.

Aos meus pais, por todo apoio e esforço constante em todos estes anos. Sem vocês, não seria possível, obrigado.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo caracterizar as areias siliciosas que se encontram numa área licenciada para prospeção e pesquisa, na região de Alpedriz, Alcobaça. As areias siliciosas são uma matéria-prima fundamental em vários setores industriais, com destaque para o fabrico de vidro e construção, mas também em moldes de fundição, na fraturação hidráulica e em filtros. Estas indústrias impõem parâmetros de qualidade apertados; desta forma, a caracterização e avaliação da qualidade das areias é uma etapa fundamental.

O trabalho experimental envolveu prospeção sísmica de refração numa área com cerca de 8,6 hectares, e recolha de amostras *in-situ* a três profundidades. A prospeção sísmica permitiu identificar superfícies de refração que foram interpretadas como a base e o topo da formação de areias com interesse para exploração. As amostras de areias foram analisadas em termos de teores dos elementos químicos (XRF) e dos minerais principais (*QEMSCAN*).

A sílica é o elemento químico dominante, com mais de 95% em peso (recalculado para óxido); dos restantes elementos destaca-se o potássio com quantidades entre 1,5 a 2,5 % e o alumínio entre 0,8 e 1,5%. Os teores em ferro são variados, mas nas análises efetuadas foram sempre inferiores a 0,25%. A análise *QEMSCAN* gera uma imagem mineralógica relativa a uma janela de amostragem com cerca de 15 mm². Os resultados desta análise mostram que o quartzo é o mineral predominante, com cerca de 92%, a que se segue o feldspato potássico com 6%, e a série das plagioclases com pouco mais de 0,8%. Os minerais com ferro, que são contaminantes para a indústria do vidro, ocorrem em quantidades baixas, e entre estes destaca-se a turmalina com 0,2%. Os resultados do *QEMSCAN* permitiram ainda o estudo morfométrico dos grãos de areia, e a classe de rolamento mais abundante é a sub-angular, com pouco mais de 30%.

As superfícies de topo e base, identificadas pela sísmica, permitiram a estimação dos recursos de areia no local de estudo em cerca de 2 Mm³. Face a estes resultados, estas areias mostram qualidade suficiente e potencial para abastecer as indústrias mencionadas, após processamento de valorização por lavagem e classificação.

Palavras-chave: Areias siliciosas; Prospeção sísmica de refração; *QEMSCAN*; XRF; Estimção do recurso

Abstract

This work aims to characterize the siliceous sands of a licensed area for exploration and mining, in the region of Alpedriz, Alcobaça. Silica sands are a key raw-material in many industrial sectors, with special emphasis on glass and construction, but also in casting molds, hydraulic fracturing and filters. These industries impose high quality parameters and, in this context, the characterization and evaluation of the sand quality is a fundamental step.

The experimental work involved seismic refraction prospecting of an area of about 8.6 ha, and in-situ sampling of sands at three depths. The seismic results allowed identifying surfaces of refraction that in turn allowed the correspondence with the base and top of the sand formation. The sample sands were analysed in terms of the chemical elements contents (XRF) and main minerals (QEMSCAN).

The silica is the dominant chemical compound, with more than 95% by weight (recalculated to oxide); of the remaining elements stands out potassium with amounts between 1.5 to 2.5% and aluminium with amounts between 0.8 and 1.5%. The iron contents varied, but in the analysed samples they were always lower than 0.25%. The QEMSCAN analysis generates a mineralogical image relative to a sampling window with about 15 mm². The results of this analysis show that quartz is the predominant mineral, with about 92%, followed by potassium feldspar with 6%, and the series of plagioclases with no more than 0.8%. Minerals with iron, which are contaminants for the glass industry, occur in low quantities, among which the tourmaline with 0.2% stands out. The QEMSCAN analysis also allowed a morphometric study of the sand grains, which predominant class is sub-angular, with a little more than 30%.

The top and bottom surfaces, identified by seismic refraction, allowed the estimation of sands resources at the study area in about 2 Mm³. Faced with these results, concludes that these sands show sufficient quality and potential to supply the above-mentioned industries, after hydraulic washing and classification processing steps.

Keywords: Silica sands, Seismic refraction, QEMSCAN; XRF; Resources estimation

Índice Geral

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ORGANIZAÇÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO	5
2	AREIAS SILICIOSAS ESPECIAIS	7
2.1	ORIGEM E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	7
2.2	INDÚSTRIA EXTRATIVA PORTUGUESA	8
2.3	PROCESSAMENTO E BENEFICIAÇÃO	10
2.4	APLICAÇÕES INDUSTRIAIS	13
2.4.1	<i>Exploração de hidrocarbonetos.....</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Indústria metalúrgica.....</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>Indústria vidreira</i>	<i>17</i>
2.5	VIDRO	18
2.5.1	<i>Especificações granulométricas da areia de vidro</i>	<i>20</i>
2.5.2	<i>Componentes e especificações químicas para os diversos tipos de vidro</i>	<i>22</i>
2.5.2.1	<i>Vidros de recipiente e de cor.....</i>	<i>25</i>
3	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	29
3.1	REGIONAL	29
3.2	LOCAL	32
4	MÉTODOS.....	33
4.1	ENSAIO GRANULOMÉTRICO	33
4.1.1	<i>Módulo de finura</i>	<i>34</i>
4.1.2	<i>Índice de finura</i>	<i>35</i>
4.2	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (XRF)	36
4.3	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE MINERAIS POR MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO ...	38
4.3.1	<i>Avaliação mineralógica.....</i>	<i>38</i>
4.3.2	<i>Morfometria 2D.....</i>	<i>39</i>
4.4	SÍSMICA DE REFRAÇÃO	41
4.5	MODELAÇÃO GEOLÓGICA	44
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	47
5.1	AMOSTRAGEM	47
5.2	ENSAIO GRANULOMÉTRICO E UTILIZAÇÃO INDUSTRIAL DAS AREIAS	48
5.2.1	<i>Perspetiva da indústria vidreira.....</i>	<i>48</i>
5.2.2	<i>Perspetiva de outras indústrias consumidoras.....</i>	<i>50</i>
5.3	ANÁLISE MINERALÓGICA	51

5.4	ANÁLISE QUÍMICA	55
5.5	ANÁLISE DO PROCESSAMENTO	57
5.6	APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DAS AREIAS	58
5.6.1	<i>Indústria do vidro</i>	58
5.6.2	<i>Outras indústrias</i>	59
5.7	AVALIAÇÃO DE RECURSOS	60
5.7.1	<i>Prospecção sísmica de refração</i>	60
5.7.2	<i>Estimação de recursos - Modelação geológica</i>	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS AREIAS DA ÁREA EM ESTUDO	73
6.2	PRESPECTIVAS FUTURAS DE TRABALHOS RELACIONADOS COM ESTE DEPÓSITO	74
	REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS	75
	ANEXOS	79

Índice de figuras

Figura 1 - Enquadramento geográfico, no mapa de Portugal, da área de estudo (rosa), correspondente à área atualmente concessionada para exploração. Com base na carta militar nº 137 (1:25.000). M - distância à meridiana; P - distância à perpendicular	4
Figura 2 - Principais substâncias produzidas em Portugal no ano de 2015	9
Figura 3 – Vista panorâmica da central de beneficiação das areias da empresa SACT, LDA.	12
Figura 4 - Diagrama do circuito de processamento de areia.....	13
Figura 5 - Curvas de volume específicos vs. temperatura, típicas de um material em transição vítrea.....	19
Figura 6 - Fluxograma das etapas no processo produtivo de vidro.....	20
Figura 7 - Lote típico das matérias primas no vidro silicatado-sodo-cálcico.	22
Figura 8 - Funções relativas dos óxidos no vidro.	24
Figura 9 - Perfil Geológico e legenda representativos do corte Nazaré - Alpedriz.....	30
Figura 10 - Extrato da folha 26-B da Carta Geológica de Portugal (Alcobça), com a localização da zona de estudo (área a cor de rosa) e respetiva planta topográfica. Área de aproximadamente 8.6 hectares.....	31
Figura 11 - Zona atualmente em exploração integrada na área de estudo - "Areiro Camarão 4"	32
Figura 12 - Fluxograma que sintetiza os trabalhos de campo realizados no local e os trabalhos de gabinete assim como a ligação com os resultados.....	33
Figura 13 - Espectrómetro de fluorescência de Raios X utilizado. Modelo: Thermo Scientific Niton XL3t X-ray.....	37
Figura 14 - Esquema ilustrativo do método <i>QEMSCAN</i>	39
Figura 15 - Exemplo da projeção 2D das classes de rolamento.....	40
Figura 16 - Morfologia e parâmetros analisados dos grão de areia de fraturação (propante).	41
Figura 17 - Propagação de uma onda sísmica por refração após atingir o ângulo crítico, até atingir de novo a superfície.	42

Figura 18 - Inverso do quadrado das distâncias. O valor em x_0 é dado pela média ponderada pelo inverso da potência da distância (dx dos vários pontos conhecidos (Z)).	45
Figura 19 - Localização do ponto de amostragem sobre o ortofotomapa.	47
Figura 20 - Comparação da distribuição granulométrica das amostras relativamente à referida por Aydın, 2000.	49
Figura 21 – Curvas granulométricas das três amostras recolhidas.	50
Figura 22 - Imagem de partículas da composição mineralógica modal (em baixo) e legenda de cores (à direita) da amostra de areia analisada.	52
Figura 23 - Histograma circular da composição mineralógica total.	53
Figura 24 - Imagem e mineralogia modal <i>QEMSCAN</i> (sem quartzo) mostrando grãos individuais contaminantes. Verificam-se essencialmente feldspatos potássicos (verde), plagioclases (azul claro) e turmalina (roxo). Um grão de cianite mostra inclusões de vários óxidos e alguns materiais <i>não classificados</i> .	54
Figura 25 - Tipos de partículas relevantes na amostra analisada. a) Quartzo essencialmente puro; b) Contaminantes individualizados (leves e pesados); c) Partículas mistas de quartzo com inclusões e/ou coberturas por outros minerais contaminantes.	55
Figura 26 - Histograma das frequências absolutas por tipo de grão com base na sua classe de rolamento.	60
Figura 27 - Localização dos perfis sísmicos de refração (linhas a vermelho) realizados na área de estudo (linha branca) sobre o ortofotomapa.	61
Figura 28 - Exemplo do traçado das dromocrónicas correspondente a um perfil sísmico e as equações das respetivas semi-retas. Tiro direto traçado à esquerda, a partir do ponto (0,0) e inverso à direita, a partir do ponto (65,0).	62
Figura 29 - Áreas delimitadas para o estudo das espessuras, corte N-S; e cortes E-O (azul escuro).	64
Figura 30 - Corte correspondente ao perfil 11, baseado na interpretação da refração sísmica na base da exploração.	66
Figura 31 - Modelo conceptual da área de estudo. SP - solo perturbado.	67
Figura 32 - Modelação das superfícies pelo IQD.	69
Figura 33 - Modelação dos volumes para o cálculo de recursos.	70

Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição química da Crosta Continental	1
Tabela 2 - Principais depósitos de areia siliciosas em Portugal.....	3
Tabela 3 - Composição geral das areias siliciosas e principais aplicações. Adaptado de BRGM, 1999.	7
Tabela 4 - Produção de minerais industriais, em 2015, por substâncias..	9
Tabela 5 - Preço da areia siliciosa por tonelada.....	11
Tabela 6 - Composição dos fluidos da fraturação hidráulica.....	14
Tabela 7 - Propriedades das areias de fraturação.....	15
Tabela 8 - Propriedades da areia siliciosa de fundição.....	16
Tabela 9 - Índice de finura da areia de moldação para alguns metais fundidos.....	16
Tabela 10 - Especificações granulométricas da areia para o fabrico de vidro segundo BS 2975-1:1998.....	21
Tabela 11 - Efeito da granulometria da areia nas etapas da produção de vidro.	21
Tabela 12 - Pontos de fusão aproximados de alguns compostos.	24
Tabela 13 - Classificação das areias siliciosas para a fabricação de vidro tendo em conta a presença em alguns óxidos.	25
Tabela 14 - Corantes de vidro comuns.....	27
Tabela 15 - Peneiros ASTM utilizados no ensaio granulométrico.....	34
Tabela 16 - Peneiros e coeficientes ASF originais e ponderados para peneiros intermédios.....	36
Tabela 17 - Fatores estatísticos propostos por Powers para o cálculo da classe de rolamento das partículas (<i>F e f</i>) e classificação numérica atribuída.....	40
Tabela 18 - Faixa de valores para as ondas P em solos e rochas.	43
Tabela 19 - Condições gerais de amostragem	47
Tabela 20 - Ensaio e análises efetuados nas amostras recolhida.....	48
Tabela 21- Resultados do ensaio granulométrico para as três amostras representativas da areia.....	48

Tabela 22 - Módulo e índice de Finura ASTM e ASF, respetivamente.	51
Tabela 23 - Composição mineralógica quantitativa <i>QEMSCAN</i>	52
Tabela 24 - Análise mineralógica quantitativa da areia, recalculada sem o mineral quartzo (em %).	54
Tabela 25 - Composição química total das amostras <i>tal-qual</i> (elementos maiores, menores e traço).	56
Tabela 26 - Composição química da amostra 1 Inicial (I) e depois de processada (P) - lavagem e separação magnética usuais em areias.	57
Tabela 27 - Aplicabilidade das areias de estudo em produtos de vidro.	58
Tabela 28 - Sequência de cálculos para as profundidades h1 e h2 e espessura do recurso explorável com base nas dromocrónicas da Figura 28.	62
Tabela 29 - Velocidades médias e classificação das litologias detetadas a partir superfície.	63
Tabela 30 - Espessuras de recurso detetadas na prospeção sísmica de refração, por perfil.	63
Tabela 31 - Dromocrónicas e cálculo de espessura da camada de areias argilosas subjacente ao recurso (laranja) - areias argilosas.	65
Tabela 32 - Velocidades médias e classificação de todas as litologias detetadas.	66
Tabela 33 - Coordenadas dos tiros direto(d) e inverso(i) e resultante dos cálculos de das interfaces para cada perfil sísmico.	68
Tabela 34 - Avaliação do depósito de areias (recurso) - "Areeiro Camarção 4".	71

Índice de anexos

Anexo 1 - Análise mineralógica QEMSCAN para 100% dos componentes presentes na amostra analisada.....	79
Anexo 2 - Grãos selecionados por uma malha regular para a análise da classe de rolamento da areia.....	80
Anexo 3 - Classificação numérica dos 100 grãos selecionados na imagem QEMSCAN para determinação da classe de rolamento para cada grão.	81
Anexo 4 - Interpretação de Sismogramas (SismoLPC), dromocrónicas e cálculo de profundidades (h1 e h2).....	82
Anexo 5 - Tabela das velocidades dos meios obtidas em cada perfil - resultantes da média: tiro direto e inverso.....	93

Acrónimos e Símbolos

AFS	<i>American Foundry Society</i>
ASTM	American Society for Testing and Material
BSI	<i>British Standards Institution</i>
$Cr_{média}$	Classe de rolamento média das partículas
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia.
Fe	Ferro
FEVE	Federação europeia de vidro de recipiente e louça de vidro industrial
FTU	(<i>Formazin Turbidity Unit</i>) Uma suspensão de 1,25 mg/l de sulfato de hidrazina e 12,5 mg/L de hexametenotetramina em água tem uma turbidez de 1 FTU.
IF	Índice de finura
K	Potássio
LOD	Limite de deteção
MF	Módulo de finura
Mt	Milhões de toneladas
NP	Norma portuguesa
QEMSCAN	<i>Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy</i>
SiO_2	Dióxido de Silício
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
X_nW_m	Elemento ("X") na forma de óxido ("W")

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O elemento químico silício representa 25,7% em peso da Crosta Terrestre, é o segundo elemento mais abundante, apenas superado pelo oxigénio. Não é possível encontrá-lo livre na natureza, e ocorre principalmente sob a forma de óxidos e silicatos (Haynes, 2016). O dióxido de silício, também conhecido por sílica (SiO_2), é o óxido mais abundante em toda a Crosta Terrestre (Tabela 1). A sílica é encontrada sob diferentes formas minerais, das quais o mineral quartzo é o mais comum. O quartzo possui uma estrutura cristalina bem definida e uma elevada estabilidade e resistência aos agentes de Geodinâmica Externa. Estas características conferem ao quartzo grande interesse económico, quando se encontra em grandes quantidades e sem impurezas, muitas das quais são consideradas contaminantes nas indústrias que o consomem.

Tabela 1 - Composição química da Crosta Continental segundo Rundnick & Gao (1967)

Óxidos	Crosta superior	Crosta média	Crosta inferior	Crosta TOTAL
SiO ₂ (sílica)	66,60	63,50	53,40	60,60
Al ₂ O ₃	15,40	15,00	16,90	15,90
FeO	5,04	6,02	8,57	6,71
CaO	3,59	5,25	9,59	6,41
MgO	2,48	3,59	7,24	4,66
Na ₂ O	3,27	3,39	2,65	3,07
K ₂ O	2,80	2,30	0,61	1,81
TiO ₂	0,64	0,69	0,82	0,72
P ₂ O ₅	0,15	0,15	0,10	0,13
MnO	0,10	0,10	0,10	0,10
Total	100	100	100	100

Regra geral, a sílica encontra-se associada a elevados graus de pureza, sob a forma de quartzitos, metaquartzitos, veios de quartzo ou areias siliciosas. As areias são um dos recursos mais abundantes na superfície terrestre, no entanto na sua forma mais pura, areias com composição em SiO_2 superior a 95%, disponíveis em grandes quantidades na Crosta superior e, portanto, de extração simples e económica, são recursos relativamente raros de se encontrar, limitando as aplicações destes materiais em produtos de menor valor acrescentado.

As areias siliciosas (areias de quartzo ou areias especiais) são uma matéria-prima associada a várias indústrias, como é o caso da indústria vidreira. Para além do fabrico do vidro

e materiais afins, existe ainda um grande consumo na indústria da fundição (moldes) e na extração de hidrocarbonetos nalguns países produtores. Por fim o consumo, bem mais estável e sempre elevado, na indústria da construção, pode utilizar também este tipo areias como agregado para betão e argamassa ou na fabricação de produtos especiais para a construção, embora esta indústria consuma as areias com recurso a especificações bem menos rigorosas em relação às anteriores. Com exceção deste último caso, todos os outros exemplos têm justificado crescentes exigências no controlo da qualidade das matérias primas. Outras aplicações comuns da areia siliciosa são os filtros para tratamento de águas, o fabrico de tintas e polímeros e até a construção de campos desportivos (golfe e voleibol, picadeiros, entre outros).

No entanto, é nas indústrias de alta tecnologia, como a eletrónica, que o valor acrescentado do quartzo é mais significativo. Aqui é necessário cumprir especificações muito exigentes, onde a percentagem em SiO_2 é o critério que decide a utilização industrial ou não de um material silicioso, devendo o mesmo conter teores requeridos que chegam a ultrapassar 99,99990% em SiO_2 , valores que as areias siliciosas dificilmente atingem, mesmo depois de passarem por sucessivos processos de concentração. Por tal, estas indústrias preferem geralmente o quartzo sob a forma de quartzitos ou veios de quartzo.

Segundo a USGS, em 2015 a produção mundial de areia siliciosa e cascalho silicioso foi de 189 Mt, enquanto que em 2011 a produção apenas rondava 126 Mt, isto significa um crescimento de 50% em 4 anos. Nos EUA, o método de fraturação hidráulica para a exploração de hidrocarbonetos com recurso à injeção de areia siliciosa (*fracking*) tem vindo a aumentar, o que tem influenciado o aumento da procura por este tipo de recurso neste país (Dolley, 2015).

Em Portugal, as indústrias extrativa e vidreira/cerâmica tem uma longa tradição e história de sucesso económico, e a interdependência entre elas evidente, desde a extração de minerais silicatados, até ao seu processamento e à beneficiação para posterior fabrico de vários tipos de cerâmicas e outros materiais que contenham estes compostos como matéria prima base. Segundo Moura & Velho (2011), os centros produtores de areias especiais siliciosas para alimentar as indústrias que se destacam pela produção em grandes quantidades, localizam-se essencialmente na zona do Litoral centro, sendo a região económica principal para a produção e utilização deste tipo de areias, definida pelo triângulo com vértices na Figueira da Foz, Marinha Grande e Rio Maior.

Na Tabela 2 estão apresentados alguns dos principais depósitos de areias siliciosas em Portugal, estudados por vários autores, com destaque para as suas características e condicionantes granulométricas, químicas/mineralógicas, bem como a avaliação do seu potencial geo económico.

Tabela 2 - Principais depósitos de areia siliciosas em Portugal

Regiões de ocorrência	% Sílica (SiO ₂)	Granulometria dominante (mm)	Condicionantes	Potencial Geoeconómico	Autor
Aguieira	-	Variável	Granulometria e composição química inconstantes	-	Moura & Velho, 2011
Alhadas	87 a 95	0,5-0,250 > 60%	Ocorrência de níveis argilosos	Vastas reservas	Velho, 2011
Barrosa	-	-	-	≈550 Mt	Moura & Velho, 2011
Península de Setúbal (Coina)	>95	0,5-0,250 >80%	Densidade de urbanização e indefinição de áreas	Muito elevado (possivelmente o maior do país)	Moura & Velho, 2011 & T. Azevedo, 1991 apud Galopim de Carvalho, 2008
Óbidos	-	-	-	Por avaliar (pequena dimensão)-	Filipe et al., 2010
Rio Maior	>95	0,125-0,707	-	Muito elevado (≈1300Mt)	Galopim de Carvalho, 2008 & Moura & Velho, 2011
Roussa (Pombal)	>90	Fina a média	-	Por avaliar	Moura & Velho, 2011

A areia, por ser muito abundante e por se encontrar na maioria das ocasiões explorável à superfície ou relativamente perto desta, é um recurso muito vulgarizado e só raramente é sujeito a trabalhos de prospeção geológica detalhados que, contudo, seriam úteis para a descrição das suas propriedades e para o seu zonamento espacial. Na verdade, estes estudos são essenciais para uma correta avaliação de quantitativos (recursos e reservas) e consequente plano de exploração.

1.2 Objetivos

Esta dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pretende contribuir para a caracterização morfológica e mineralógica/química dos depósitos de areias plio-plistocénicas existentes numa exploração a céu aberto da firma *Sociedade de Areias, Construção e Turismo Lda.* em Alpedriz, concelho de Alcobaça (Figura 1). Foram realizados trabalhos de prospeção

sísmica de refração e ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas no local para o controlo de qualidade e avaliação de recursos, tendo em vista a sua aplicação industrial.

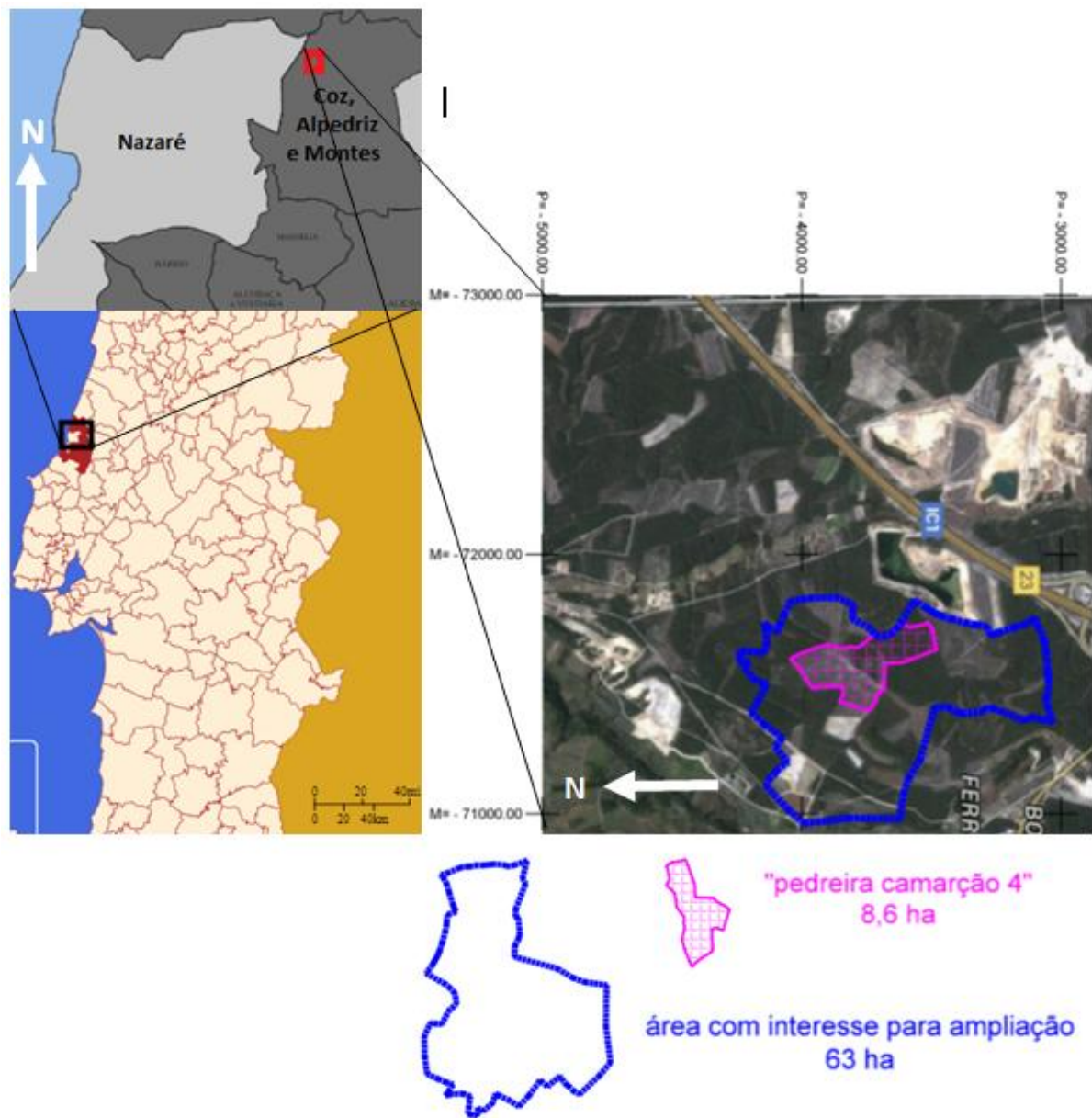


Figura 1 - Enquadramento geográfico, no mapa de Portugal, da área de estudo (rosa), correspondente à área atualmente concessionada para exploração. Com base na carta militar nº 137 (1:25.000). M - distância à meridiana; P - distância à perpendicular

1.3 Organização geral da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos principais:

No Capítulo 1 foi feito um breve enquadramento da abundância da matéria prima quartzo, sua ocorrência e a exploração de areias para as várias indústrias, com enfoque nas areias industriais deste género no contexto de Portugal e são apresentados os principais objetivos do trabalho e a localização da área de estudo que serviu de base a este trabalho.

O Capítulo 2 faz referência às principais indústrias consumidoras de areias siliciosas com destaque para o caso português, nomeadamente para três indústrias consideradas entre as mais relevantes pelos seguintes aspetos:

- Na vidreira, por o vidro ser ainda hoje o material que mais utiliza areias siliciosas com graus de pureza elevados e pelo crescente número de patentes e combinações entre materiais associados ao vidro e à sílica pura.

- Na metalúrgica (fundição), pelo facto dos moldes em areia serem, hoje em dias, o tipo de moldagem mais comum na fundição do ferro e aço e ainda por esta indústria, nomeadamente nos moldes, desempenhar um papel de excelência em Portugal.

- Na petrolífera, pelo crescente interesse na pesquisa e prospeção de hidrocarbonetos em Portugal aliado ao facto de eventuais explorações estarem ligadas a este tipo de areias, utilizadas como propante, na fraturação hidráulica.

O Capítulo 3 aborda a área de estudo, mais propriamente o enquadramento geológico das formações abrangidas pelo estudo.

No Capítulo 4 é exposta a metodologia utilizada no trabalho realizado: amostragem, ensaios e métodos utilizados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos dos trabalhos de campo e laboratório, a sua análise bem como a aplicabilidade das areias, principalmente na indústria vidreira e nos vários produtos de vidro, e a avaliação dos recursos locais. Sugerem-se ainda propostas para a melhoria da qualidade dos recursos para as indústrias.

Por fim, o Capítulo 6 contempla considerações finais e gerais do trabalho desenvolvido, bem como perspectivas de trabalhos futuros a realizar no âmbito da temática das areias siliciosas nesta região.

2 AREIAS SILICIOSAS ESPECIAIS

2.1 Origem e principais características

As areias são o resultado da fragmentação de rochas preexistentes por ação de agentes da Geodinâmica Externa, nomeadamente, o vento, chuva, escorrência superficial da água, atividade biológica e mudanças de temperatura. A sua "maturação" físico-química, geralmente entendida como o grau de arredondamento dos grãos em conjugação com a sua pureza em quartzo, é atribuída à ação daqueles agentes e ao tempo de transporte até à sua deposição. Este conceito pode ser entendido e analisado a partir das medições do tamanho e forma dos grãos bem como da sua composição química e mineralógica. O princípio comum é, no entender de Dias (2004) a investigação dos grãos de quartzo, embora outro tipo de grãos também deva ser analisado. Segundo este autor, a forma dos grãos depende de quatro fatores principais:

- a) A dureza, fragilidade e a resistência à abrasão;
- b) As zonas de fraqueza, tais como clivagens, fraturas, estratificação, foliação, e outras;
- c) A feição original dos grãos, pois é esta que condiciona as formas que as mesmas vão assumir durante as diferentes fases do ciclo sedimentar;
- d) Os agentes que transportaram o grão e as características desse transporte, incluindo a distância e a energia (velocidade) do mesmo.

As areias siliciosas são essencialmente constituídas por grãos de quartzo, com dimensões compreendidas entre 62,5 μm e 2 mm, podendo ser classificadas de acordo com a pureza em sílica (SiO_2) e a presença de outros óxidos contaminantes como é possível observar na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição geral das areias siliciosas e principais aplicações. Adaptado de BRGM, 1999.

Tipo de areia	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	Aplicações
Siliciosas puras/ extra siliciosas	> 99	<0,02	-	Vidro técnico, cristalaria e alguns vidros planos
siliciosas	> 98	<0,2	<0,4	Vidro prensado, plano, fundição, cerâmica, abrasivos e produtos especiais na construção civil
Siliciosas magras	95 a 97	-	-	Fundição, vidros coloridos, filtragem e produtos na construção civil
Silicoargilosas	75 a 92	-	-	Principalmente na fundição, construção civil, alimentação animal e filtragem

A composição química é o parâmetro primordial para a utilização de tais areias na indústria do vidro, sendo a granulometria igualmente um critério de seleção muito importante para uma areia siliciosa, em particular para as suas aplicações em moldes de fundição onde a dimensão máxima dos grãos deve ser da ordem dos 0,5 mm (BRGM, 1999). São exploradas quase na sua totalidade a céu aberto, embora também possam existir algumas explorações subterrâneas quando, em dada região, o recurso apresenta elevado interesse económico. Os depósitos de areias siliciosas devem apresentar uma relativa homogeneidade no que respeita às características granulométricas e químicas das areias (BRGM, *op. cit.*).

2.2 Indústria extrativa portuguesa

O aparelho produtivo nacional tem vindo a decrescer desde o final dos anos 80 - início dos anos 90, acompanhando de um modo geral as subidas e descidas anuais da então CEE, atual União Europeia. Este problema deve-se em parte à deslocalização de algumas indústrias de grande importância no contexto do país, para as economias emergentes, tal como as do leste europeu, a chinesa, etc., cuja mão de obra é mais barata. A indústria portuguesa vem sofrendo, de um modo geral, uma quebra tanto no número de empresas manufatureiras, como nas quantidades produzidas e no pessoal empregado e especializado, o que tende a afetar a procura interna de recursos. Tal foi reforçado, nos últimos anos, pela crise económica internacional, acentuada pela deslocação industrial e de capitais atrás referida.

Segundo a análise de dados da DGE - Direção Geral de Energia e Geologia, em 2015 as principais substâncias minerais exploradas em Portugal, base importante de alguma indústria, eram ainda os minérios de cobre, contribuindo com cerca de 34% do total de substâncias produzidas no país, seguido das águas minerais e de nascente, 19% e pedra britada com 11%. No que diz respeito à produção de areias para construção e de substâncias minerais diversas, onde se deverão incluir as areias siliciosas ou especiais, as mesmas não somaram 10% dos recursos produzidos (Figura 2). Anote-se que poderá haver alguma confusão em relação à contabilidade dos vários tipos de areias e/ou minerais industriais, não se considerando por vezes as suas aplicações, uma vez que algumas empresas exploradoras podem comercializar em simultâneo areias siliciosas tanto para a indústria vidreira, cerâmica, química ou de fundição, como para a construção civil, que utiliza maioritariamente areias comuns.

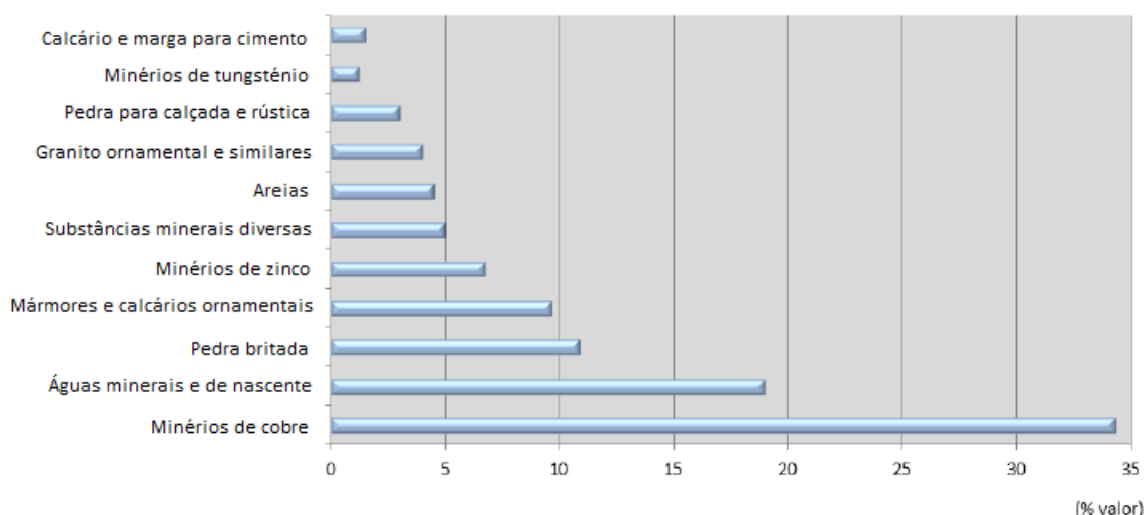


Figura 2 - Principais substâncias produzidas em Portugal no ano de 2015 (Direção Geral de Energia e Geologia, 2016)

A Tabela 4 mostra que a produção de minerais industriais, segundo dados da DGEG (2016), revelando que a produção de areia especial (siliciosa) decresceu 2.9 % em relação a 2014 embora tal decréscimo não seja comparável ao de outras substâncias importantes das indústrias cerâmica e química, como as argilas especiais (-24,0 %) e o sal gema (-33,3 %), respetivamente.

Tabela 4 - Produção de minerais industriais, em 2015, por substâncias. Adaptado de Direção Geral de Energia e Geologia, 2016.

Minerais industriais	2015		variação 2015/14 (%)
	(ton.)	(10 ³ €)	
Areia especial	1.177.144	18.694	-2,9
Areias feldspáticas	84.833	870	10,5
Argila comum	1.771.493	5.227	34,4
Argila especial	218.704	2.776	-24,0
Calcário para a indústria transformadora	1.249.877	4.672	-2,5
Caulino	251.582	8.360	-0,6
Feldspato	93.789	1.557	25,1
Pegmatito c/ lítio	17.120	255	-8,3
Sal-gema	30.008	1.623	-33,3
Talco	11.204	713	-20,0
Outros	123.328	615	-9,0
TOTAL	5.029.081	45.361	-2,0

Estes dados também permitem determinar que o preço médio por tonelada de areia especial em 2015 foi de aproximadamente 15,88 Euro (€).

2.3 Processamento e beneficiação

Como já foi mencionado, as areias ricas em sílica são, do ponto de vista económico, mais rentáveis do que a areia comum. No entanto, na maioria das vezes é necessário separar os grãos de quartzo, eliminando os restantes componentes, o que contribui para aumentar o teor em sílica e também o valor acrescentado desse recurso. A separação dos grãos tem por base as propriedades físicas e químicas dos minerais constituintes da areia, e as principais, segundo Hayes (1993) *apud* Sinton (2006), são, relativamente às partículas constituintes dos grãos o/a:

- Tamanho
- Densidade
- Suscetibilidade magnética
- Condutividade elétrica
- Reatividade química da superfície da partícula

Para as utilizações mais exigentes na indústria, de maior valor acrescentado, devem utilizar-se processos de separação e concentração até a areia cumprir com os requisitos necessários, aumentando o teor em sílica livre para próximo de 100%. O mineral quartzo e a sua pureza controla determina a qualidade final da matéria-prima areias siliciosas.

Após a extração, lavagem e classificação das areias siliciosas procede-se à sua beneficiação numa central de processamento, que consiste na remoção dos minerais não quartzo, que são considerados contaminantes. Alguns minerais muito comuns como a turmalina, o zircão e a titanite, são compostos por metais como o ferro, zircónio e titânio, e são mais densos do que o quartzo podendo por isso ser separados por métodos que explorem a diferença de densidade. Outros minerais igualmente abundantes em areias como a calcite, os feldspatos potássicos e calcossódicos e as partículas mistas com inclusões de diversos compostos têm densidade semelhante ao quartzo, e por isso não se separam por métodos mecânicos convencionais de lavagem e classificação por tamanho ou densidade. Nalguns casos, quando estes minerais são a fração mais fina podem ser separados e reaproveitados como, por exemplo, o caulino nas areias de Rio Maior. Quando não existe mercado, estes sub-produtos são depositados numa lagoa de rejeitados.

Os métodos físicos utilizados no processamento e beneficiação de areias para remoção de minerais pesados são, por regra:

- **Separação magnética** – quando existem partículas, geralmente monominerais, que são deslocados por um campo magnético (magnéticas ou paramagnéticas);

- **Separação gravítica** – quando os minerais que se querem separar dos grãos de quartzo têm densidade muito mais elevada. Em laboratório podem ser utilizados *líquidos densos*, como o bromofórmio ou tungstato; em centrais de processamento industriais podem ser usadas mesas wifley, espirais ou jigas.
- **Separação por flutuação** – quando existem grãos hidrófobos e grãos hidrofóbicos, podendo ser adicionados reagentes que estimulem estas características. Por exemplo os grãos de quartzo tendem a “fugir” do meio aquoso (hidrofóbico) podendo ser capturados por bolhas de ar que atravessem a mistura. Como são as partículas hidrofóbicas que interessam, a flutuação tem a designação de inversa.

Normalmente, para as aplicações industriais convencionais, aqueles últimos dois casos acabam por não interessar à maioria das pequenas empresas que exploram as areias, ficando tais métodos de beneficiação ligados a empresas maiores que vendam este recurso para o fabrico de produtos de maior valor acrescentado. A necessidade de processamentos mais onerosos, como a flotação, é justificada para o fabrico de painéis solares, vidros óticos (microscópios, lupas, etc.) e alguns vidros especiais.

Na Tabela 5 apresentam-se os preços de mercado para areias siliciosas, em euros por tonelada, à saída da fábrica e sem outros custos associados como os de transporte. Estes valores, dados por Alonso (2014), têm em conta o tratamento e beneficiação destas areias em relação ao teor em ferro assinalado.

Tabela 5 - Preço da areia siliciosa por tonelada, por Alonso (2014).

Areia de sílica	Teor em ferro	Preço € / t
Sem tratamento (bruto)	-	2,50
Amarela semi-lavada	-	5,50
Lavada calibrada	-	12,00
Purificada (SiO ₂ > 99,3 %)	-	16,00
Purificada (SiO ₂ > 99,5 %)	0,030 %	25,00
Purificada (SiO ₂ > 99,8 %)	0,010 %	60,00

O preço médio dado pela análise da Tabela 4 (DGEG, 2016) de aproximadamente 15,88 Euro (€) quando comparado com valores referidos por Alonso (2014), mostra que, para o caso das areias em Portugal, existe já alguma beneficiação para além da simples lavagem e classificação efetuada por parte das empresas.

De um modo geral, os métodos de processamento podem ser combinados entre si e aplicados numa central de beneficiação. Segundo a *BGS / British Geological Survey* (2004), aqueles passam pela melhoria da qualidade da areia particularmente com recurso a dois

processos que englobam a beneficiação dos depósitos explorados naquele país com maior viabilidade e potencial industrial. São eles:

- **A lavagem com um tromel, em meio húmido**, pretendendo-se com este método remover as argilas ligadas à superfície do quartzo e outros finos agregados.
- **A lixiviação a quente**, normalmente efetuada com ácido sulfúrico, com o objetivo de remover as coberturas ferruginosas depositadas na superfície dos grãos.

Na Figura 4 e Figura 3 é possível ver uma fotografia da central de beneficiação das areias e o diagrama do processo (informação transmitida pelo Eng.º Alexandre Neves em visita à empresa *SACT, LDA*). As operações unitárias principais são a lavagem (nora de decantação) e classificação do *tal-qual* com crivos e separação das partículas finas da água por hidrociclones. São utilizadas telas transportadoras e condutas para o transporte dos materiais dentro da central. No final as areias são colocadas em lotes para as indústrias vidreira e da construção civil na região.



Figura 3 – Vista panorâmica da central de beneficiação das areias da empresa SACT, LDA.

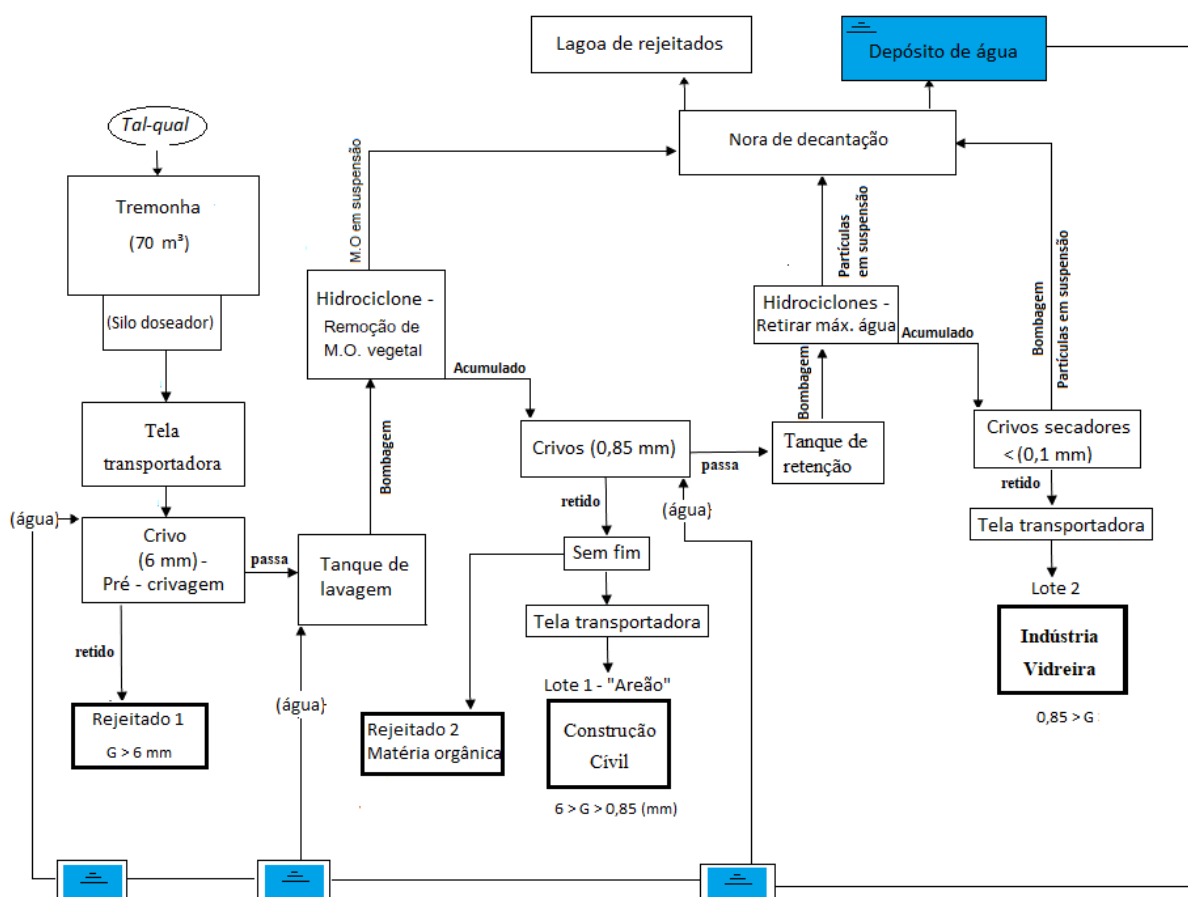


Figura 4 - Diagrama do circuito de processamento de areia (SACT, Lda.).

2.4 Aplicações industriais

Os aspetos determinantes para o aproveitamento económico das areias siliciosas são essencialmente dois: a quantidade em sílica (SiO_2) e a ausência de impurezas / contaminantes, como óxidos de ferro e minerais prejudiciais à sua utilização industrial. Outro fator muito importante é a granulometria, com destaque para a forma dos grãos e distribuição granulométrica, uma vez que a presença de algumas partículas tanto demasiado finas como grosseiras pode prejudicar a qualidade do produto final.

Duas areias que tenham a mesma composição química podem revelar-se, uma como um bom produto de mercado, no caso de só conter impurezas individualizadas argilosas ou magnéticas que possam ser eliminadas através de tratamentos simples (lavagem, classificação e separação magnética), a outra, pelo contrário, como inapropriada à valorização económica, se contiver impurezas dificilmente separáveis (BRGM, 1999). Essa diferença pode ser devida à presença excessiva de certos minerais contaminantes tais como feldspatos ou coberturas de

óxidos prejudiciais, cuja eliminação implique o uso de tratamentos mais onerosos. Um último caso prende-se com a existência abundante de partículas mistas, ou seja, se os contaminantes estão presentes como inclusões dentro dos grãos de quartzo. Neste caso, a beneficiação destas areias pode tornar-se impraticável tendo em consideração a viabilidade económica.

As três principais indústrias consumidoras de areias siliciosas de boa qualidade são a da exploração de hidrocarbonetos (fraturação hidráulica), a metalúrgica (moldes de fundição) e a vidreira. A normalização imposta pelos países produtores destes materiais de alta qualidade é geralmente bastante rígida.

2.4.1 Exploração de hidrocarbonetos

A fraturação hidráulica é um método de extração de hidrocarbonetos por injeção a alta pressão de uma mistura de água, areia siliciosa e diversos produtos químicos, de modo a forçar a abertura de fissuras num maciço rochoso que permitam extrair petróleo ou gás natural. A areia funciona como propante, ou seja, mantém as fraturas abertas de modo a facilitar a circulação dos fluidos e a extração para a superfície.

Os requisitos principais para o uso da areia como propante prendem-se com a esfericidade, rolamento, seleção e ausência de outros minerais que não quartzo, como feldspatos, calcite e argilas. A resistência ao esmagamento é um parâmetro mecânico de extrema importância a testar neste tipo de aplicação. Em termos químicos, a solubilidade em ácido utiliza-se para a análise de possíveis inconvenientes que possam advir de minerais indesejáveis como a calcite ou de sais que possam reagir com os solventes adicionados ao poço de perfuração antes ou após a fraturação, tais como HCl (ácido clorídrico), NH_4^+ (amónio) e $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (peroxodissulfato). Outros desses produtos químicos podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição dos fluidos da fraturação hidráulica Adaptado de GWPC & ALL Consulting, (2009)

Solução	Percentagem (%)
Água e areia	99,51
Ácido	0,123
Petróleo destilado	0,088
Isopropanol	0,085
Cloreto de potássio	0,06
Goma de Hidroxietilcelulose	0,056
Etilenoglicol	0,043
Carbonato de sódio / potássio	0,011
Cloreto de sódio	0,01
Sais de borato	0,007
Ácido cítrico e dimetilformamida	0,006

As areias entre as dimensões dos peneiros ASTM 20 e 40 (0,85/0,42 mm) e entre os peneiros 40 e 70 (0,42/0,21 mm) são as mais utilizadas e especificadas pelos países que utilizam este processo de extração. Porém, todas as dimensões entre 1,70 e 0,106 mm podem também ser utilizadas com intervalos bem selecionados. Na Tabela 7 é possível observar as várias propriedades e limites inerentes às areias siliciosas após beneficiadas para uso na fraturação hidráulica.

Tabela 7 - Propriedades das areias de fraturação. Adaptado de Mitchell (2015).

Propriedade	Limites
Composição	> 99% de sílica, SiO ₂ (Quartzo ou quartzo revestido com resina) ou 100% de cerâmicos
Tamanho das partículas	Distribuição granulométrica de 90% dentro dos intervalos de tamanho especificados: #12/20 (1.700 - 0.850 mm); #20/40 (0.850 - 0.425 mm); #40/70 (0.425 - 0.212 mm); #70/140 (0.212 - 0.106 mm)
Forma das partículas	Bem rolado, grãos esféricos (>0.6 para areia de quartzo e >0.7 areia revestida com resina e propantes cerâmicos)
Resistência ao esmagamento	Resistir à tensão de compressão entre 4000 - 6000 psi (28 - 42 MPa), determinado com 10% de material triturado
Solubilidade em ácido	Limite de material solúvel em ácido: (<2% ≥30 / 50, <3% <30/50, <7% para areia revestida com resina ou propantes cerâmicos)
Turbidez	Limites de argila (<0.002 mm) e silte entre (0.002 - 0.063 mm), contendo uma turbidez máxima de 250 FTU (Unidades de turbidez em formazina)
Fonte: British Standards, 2010 # = tamanho da malha = número de abertura num peneiro.	

2.4.2 Indústria metalúrgica

Existem dois processos básicos em que se pode empregar a areia siliciosa como molde para fundição: a "areia verde", designação mais comum desta areia que utiliza a argila como material aglutinante e a "areia quimicamente ligada", que usa polímeros para unir os grãos quando são necessários moldes mais precisos (*AFS/American Foundry Society*, consultada em 2018). A areia verde é o sistema de moldagem mais utilizado em fundições devido, em parte, ao baixo custo, à abundância e à resistência química da areia siliciosa. Na Tabela 8 é possível observar algumas das propriedades da areia que segue para a indústria da fundição. Realça-se a imposição de 98% como valor mínimo de sílica na composição da areia a utilizar como molde. Segundo Velho (2005, 2011), relativamente à composição química das areias nesta indústria, a exigência quanto ao teor em sílica, tendo em conta a mesma finalidade, é um pouco menos elevada uma vez que especifica as seguintes proporções percentuais para os principais óxidos presentes: SiO₂ > 95%, Fe₂O₃ < 0,2%, Al₂O₃ < 0,4%.

Tabela 8 - Propriedades da areia siliciosa de fundição. Adaptado de Mitchell (2015)

Propriedade	Limites
Conteúdo em sílica (% SiO ₂)	98% no mínimo
Limites em:	CaO e MgO (para reduzir o valor de ácido e minimizar o aglutinante)
Tamanho das partículas	Intervalo entre 0,1 e 0,5 mm.
Distribuição de partículas	Distribuição de tamanho num intervalo estreito (melhora a permeabilidade)
Índice de finura	A AFS indica um intervalo entre 50-60 (0.250 - 0.220 mm)
Forma das partículas	Grãos arredondados a sub-angulosos com esfericidade razoável (de modo a reduzir a quantidade de aglutinante e melhorar as propriedades mecânicas do molde)
Fontes da informação: <i>SME</i> , (2006); Harben, (2002).	

Note-se que na indústria metalúrgica as areias utilizadas na fundição como moldes necessitam de ser testadas, de acordo com normas exigentes, tendo em conta os seguintes requisitos básicos: forma dos grãos, tamanho e distribuição granulométrica das partículas nos peneiros da AFS, composição química, resistência a esforços mecânicos (compressão e tração) e estabilidade térmica. O tamanho das partículas deve obedecer a um intervalo de 0,1-0,5 mm e a distribuição granulométrica deverá variar num curto intervalo, geralmente avaliada por um índice de finura que deve estar situado entre 50 e 60. Estes valores podem ser depois aumentados com adição de argilas ou atenuados por crivagem da areia para constituir a areia verde, a qual passa a ter um novo índice de finura que varia e pode ser ajustado consoante o tipo, tamanho e forma do metal fundido. Na Tabela 9 podemos ver alguns índices de finuras deste tipo de areias para moldar alguns metais:

Tabela 9 - Índice de finura da areia de moldação para alguns metais fundidos. Adaptado de Duval (1958).

Metal	Areia siliciosa máxima(%)	Índice de finura
Ferro	98	70-100
Aço	98	50-70
Alumínio	99	70-100
Ligas de cobre-base	98	70-140
Cobre	98	70-100

Em Portugal, a fundição dos ferros e aços usa exclusivamente o processo de areia como molde. Para uma peça até cerca de 100 kg, privilegia-se a areia verde. Normalmente usa-se como ligante a bentonite, empregue em teores variáveis, geralmente situados entre 7 % e 10 %.

Para pesos superiores a 100 kg ("fundidos de pequena série"), o processo de moldagem é manual, sendo comum empregar-se um sistema de areia semelhante ao descrito anteriormente. O sistema refratário é o mesmo da areia verde mas o ligante é uma resina em quantidades inferiores a 2% do peso da areia (APF, ISQ, & FEUP, 2014).

2.4.3 Indústria vidreira

O vidro é uma das mais antigas e virtuosas invenções da humanidade. Acredita-se que foi descoberto na Mesopotâmia aproximadamente 5000 a.C., possivelmente no decorrer da fundição de metais (metalurgia), ou por uma sequência evolucionária na produção de materiais cerâmicos naquela época (Rasmussen, 2012). Mais tarde, por volta de 1500 a.C., o vidro e sua fabricação surge no Egito, como uma grande indústria (Lambert, 2005 *apud*. Rasmussen, 2012). Atualmente esta indústria está espalhada por todo o Globo e é praticamente impossível imaginar um mundo sem vidro, desde a utilização em janelas, recipientes, automóveis, ótica, entre outras aplicações.

A indústria vidreira pode ser dividida em dois grupos que, do ponto de vista do fabrico, são bastante distintos, isto é, o grupo da produção de vidro por meios mecânicos e o do vidro produzido manualmente. O primeiro diz respeito a uma produção muito massiva e automatizada; o segundo tem objetivos mais artísticos e criativos. A indústria do vidro mecânico pode ainda ser subdividida em quatro setores principais (BRGM, 1999). Os setores do(a):

- Vidro oco - engloba toda a produção de recipientes para diversos produtos de alimentação e bebidas. O vidro tipo "tableware", comum em utensílios de mesa, também chamado de vidro de cristal (geralmente com alto teor em óxido de chumbo) é igualmente abrangido por este setor vidreiro;
- Vidro plano - destinado, principalmente, ao fabrico de vidro para edifícios e automóveis (janelas);
- Fibras de vidro - utilizadas para isolamento e reforço de vários materiais, principalmente plásticos;
- Vidro técnico - que corresponde principalmente ao vidro ótico e a outros produtos especiais, necessários a outras indústrias como a farmacêutica. Aqui inserem-se, entre outros, o vidro de sílica pura e o borossilicatado.

2.5 Vidro

O termo vidro não possui uma definição simples e precisa. Pode ter origem na natureza quando é formado espontaneamente em erupções vulcânicas, os chamados vidros vulcânicos, normalmente gerados após arrefecimento muito rápido de um magma na superfície terrestre. Aqueles são geralmente de cor escura, sendo a cor incolor bastante rara na natureza e só podem ser considerados como vidro se forem sólidos, amorfos, ou seja, não possuírem uma estrutura cristalina bem definida e tiverem composição química bastante variável, como é disso exemplo a obsidiana.

O vidro produzido artificialmente passa pelo processo de fusão das matérias primas, resultando um material cuja a viscosidade, por arrefecimento, aumenta continuamente até se transformar numa massa consistente e, eventualmente, num sólido amorfo. No final do arrefecimento as moléculas têm então um arranjo desordenado, mas uma coesão suficiente para manter alguma rigidez o que justifica, em termos práticos, denominar este material não como um líquido, mas como um sólido com uma estrutura desordenada.

Segundo Tilley (2005) este *status* do vidro é revelado pelo comportamento no aquecimento, uma vez que o vidro não mostra um ponto de fusão particular, devido às várias hipóteses de combinação dos materiais usados na sua fabricação. Assim, em vez de ponto de fusão, os vidros podem ser caracterizados por uma temperatura de transição vítrea (T_g), que não é uma propriedade fixa do material, mas sim um parâmetro útil que fornece informações que ajudam a orientar o processo de conformação do vidro durante a fase maleável. Na Figura 5 podem observar-se as curvas *volume específico v.s. temperatura* típicas das fases de um material em transição vítrea durante a fusão e arrefecimento dos seus componentes.

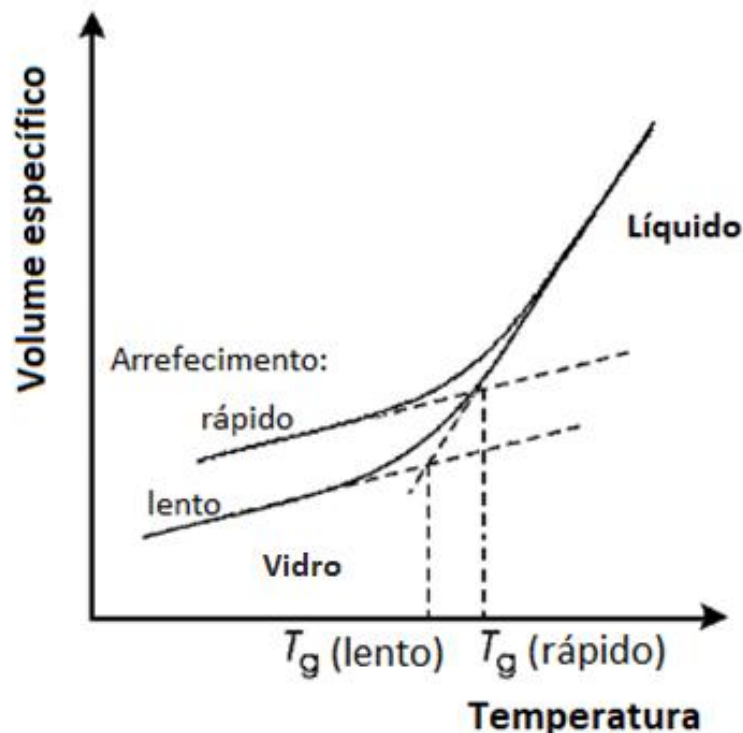


Figura 5 - Curvas de volume específicos vs. temperatura, típicas de um material em transição vítrea (Tilley, 2005).

Conforme se verifica na Figura 5 o valor de T_g é dado pela interseção das linhas extrapoladas de alta temperatura e baixa temperatura. Acima da temperatura de transição vítrea, o material pode ser considerado líquido, enquanto que abaixo da temperatura de transição vítrea, é considerado um sólido (Tilley, 2005). Em suma, o processo do aumento da temperatura conduz a mudanças na estrutura inicial da matéria durante o aumento da temperatura. Estas mudanças requerem mais volume disponível para que as moléculas se possam mover ("volume livre"); porém o volume real daquelas que constituem o material, permanece o mesmo.

Para que se cumpram os objetivos de um produto final de vidro, para além dos tipos e propriedades das matérias primas utilizadas, é também necessário um correto dimensionamento dos fornos bem como dos tempos de entrada, de fusão e de arrefecimento dos diferentes componentes na mistura a vitrificar. A Figura 6 mostra num fluxograma as etapas do processo produtivo de vidro, desde a mistura das diferentes matérias primas até à saída da fábrica.

É de notar que o tamanho das partículas das diferentes matérias-primas que entram na composição deste tipo de materiais é limitada consoante valores especificados pelo fabricante, geralmente estes são inferiores a 0,85 mm e superiores a 0,075 mm.

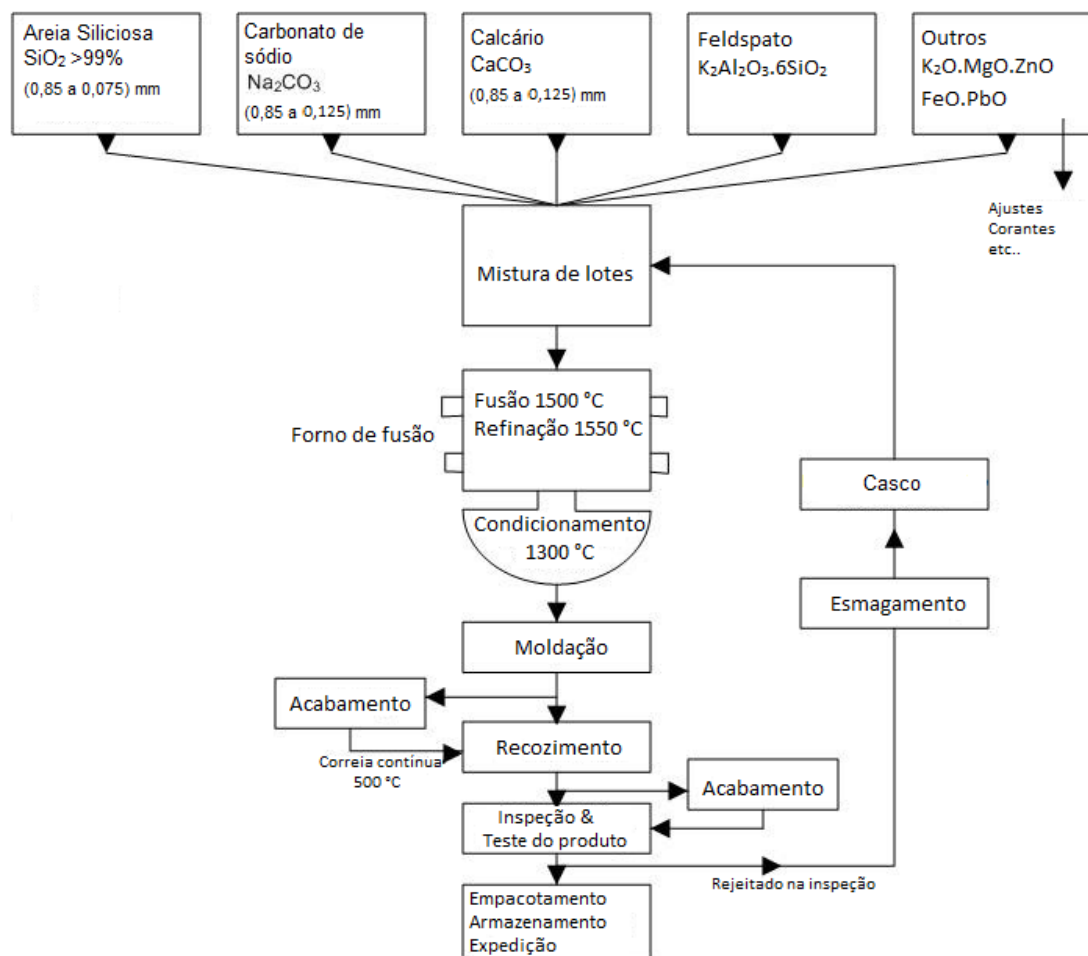


Figura 6 - Fluxograma das etapas no processo produtivo de vidro. Adaptado de (Kumar, 2009).

2.5.1 Especificações granulométricas da areia de vidro

Em geral as especificações, para a maioria dos fabricantes de vidro estabelece valores, que variam principalmente entre 0,1 e 0,5 mm, onde a maior percentagem de retidos se deve situar. De acordo com Shishkin, *et al.* (2001) a norma russa que regula as composições granulométricas, das areias siliciosas para a indústria vidreira (GOST 22551-77) especifica que as partículas com dimensão superior a 0,8 mm podem ter uma presença máxima de 0,5% na composição final enquanto que as partículas com dimensão inferior a 0,1 mm não devem exceder 5,0% do total analisado. Por sua vez, a *British Standards Institution* (na norma B.S. 2975) recomenda, em termos granulométricos para os diferentes vidros, o que se mostra na Tabela 10:

Tabela 10 - Especificações granulométricas da areia para o fabrico de vidro segundo BS 2975-1:1998 (Adaptado de Aydin (2000)).

Tamanho da malha - BSI (mm)	Tipo de vidro (% de areia)							
	Recipiente incolor	Recipiente colorido	"Tableware"	Borossilicato	Cristal de chumbo	Plano transparente	Ótico	Fibra de vidro
Retido (1)	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada	-	-
Retido (0,710)	0,25% máximo	0,25% máx	0,25% máx	0,25% máx	0,25% máx	0,25% máx	-	-
Retido (0,500)	5% máx	5% máximo	5% máx	5% máx	5% máximo	5% máx	-	Nada
Retido (0,355)	-		-	-	-	-	Nada	-
Retido (0,250)	-	-	-	-	-	-	15% máx	20% máx
Passa (0,125)	5% máx	5% máx	5% máx	5% máx	5% máx	5% máximo	5% máx	-
Passa (0,09)	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada -	Nada -

De facto, o efeito da granulometria das areias siliciosas na fabricação de vidro faz-se sentir nas etapas de fusão e arrefecimento que se seguem à mistura de lotes. Alguns efeitos e inconvenientes estão muitas vezes relacionados com tamanho e rolamento (esfericidade dos grãos x angulosidade das arestas) das partículas de quartzo presentes na areia, como se pode ver na Tabela 11.

Tabela 11 - Efeito da granulometria da areia nas etapas da produção de vidro.

Tamanho dos grãos	Rolamento dos grãos	Efeitos possíveis
Uniforme	Anguloso	Fusão rápida e homogénea
	Rolado	Fusão mais lenta
Muito variável	Anguloso	Aumento do tempo de fusão e possível segregação no arrefecimento
	Rolado	Segregação e tempo de fusão mais acentuados
Grosso (>especificado)	-	Fusão incompleta
Fino (<especificado)	-	Problemas de limpeza dos finos de sílica, bolhas de ar e prejudicar permutadores de calor

A regulamentação para outros tipos de matérias primas que entram na composição do vidro não se apresenta tão exigente em termos granulométricos, uma vez que a sua temperatura de fusão é geralmente inferior à da sílica. Porém, as areias siliciosas podem conter alguns minerais cuja constituição, mesmo com granulometrias muito reduzidas, pode trazer graves

problemas ao produto final devido à sua composição química original e interação com os restantes materiais que compõem a mistura a vitrificar.

2.5.2 Componentes e especificações químicas para os diversos tipos de vidro

Os vidros comerciais (silicatados sodo-cálcicos) podem ser produzidos com recurso a diversas matérias primas minerais. Tratam-se de compostos que lhes conferem diferentes propriedades e cores, desde coloridos a incolores, que resultam das inúmeras combinações na fusão dos vários óxidos e elementos previamente selecionados consoante o objetivo comercial. De todas as matérias primas utilizadas, aquelas que são mais comuns e contribuem em grande quantidade para a obtenção da maioria dos vidros comerciais, são a areia, carbonato de sódio (geralmente produzido de forma sintética), o calcário e a dolomite, feldspatos e outros compostos em pequenas quantidades. Por conter uma elevada percentagem de potássio, soda e alumina; o sienito nefelínico tem sido crescentemente utilizado na indústria vidreira para substituir algumas daquelas matérias primas. Após depois de beneficiado, deve apresentar granulometrias inferiores a 0,6 mm e com um teor em ferro bastante reduzido (Sampaio *et al.*, 2008; Velho, 2005; Vicente, 2015).

Na Figura 7 é possível verificar que é comum no cálculo do lote das matérias primas incluir cerca de 120 kg de material para se obter 100 kg de vidro. Este facto mostra que cerca de 20 kg se perdem durante o processo de fabrico, geralmente sob a forma de gases (CO_2) resultantes, essencialmente, das reações de decomposição térmica do calcário, da dolomite e do carbonato de sódio durante a etapa de fusão.

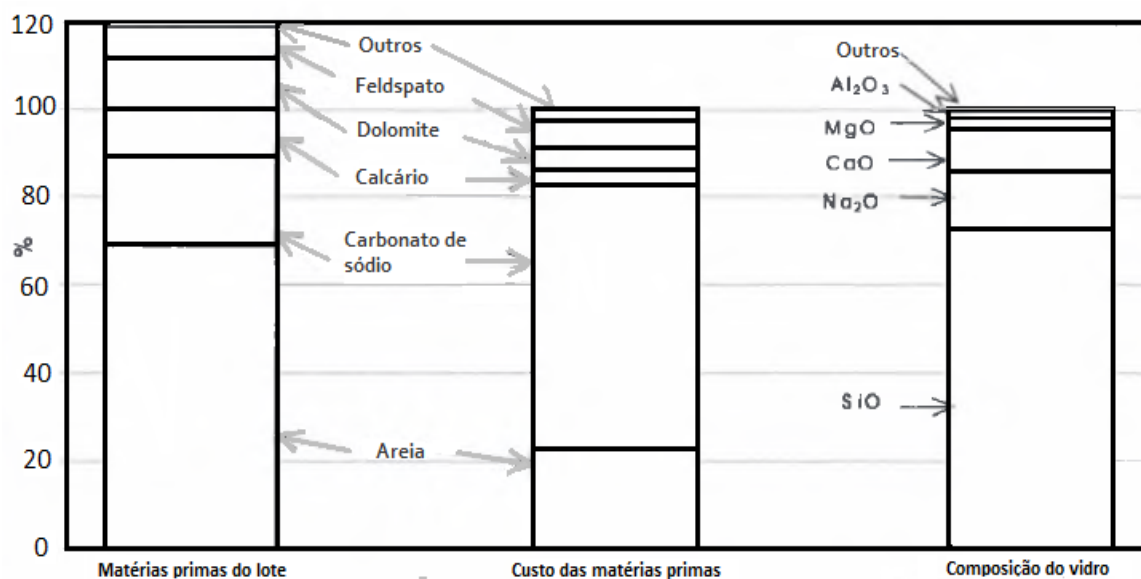


Figura 7 - Lote típico das matérias primas no vidro silicatado-sodo-cálcico (Aydin, 2000).

É interessante verificar que o custo do vidro (barra central da Figura 7) é em grande parte controlado pelo preço do carbonato de sódio, apesar da areia ser a matéria prima mais abundante no lote de componentes a fundir (barra da esquerda). O peso do carbonato de sódio no lote é geralmente de 20%, porém custa cerca de 60% de todo o conjunto. A areia, por outro lado, ocupa cerca de 70% do lote, mas a sua contribuição para o custo total é da ordem dos 23% (Aydin, 2000).

Segundo Sinton & LaCourse (2001) *apud*. Sinton (2006), o tipo de feldspato pode influenciar também o custo final do lote dependendo se são utilizados feldspatos potássicos ou calcossódicos e da proporção desejada de Na:K na mistura das matérias primas a fundir. Em termos económicos os feldspatos calcossódicos são geralmente uma opção menos dispendiosa, em comparação com feldspatos potássicos. Ainda assim, uma composição que tenha uma mistura de sódio e potássio é geralmente benéfica em termos tanto económicos como para as propriedades físicas do vidro.

Os óxidos, tais como SiO_2 , CaO , K_2O , ZnO , MgO conferem diferentes propriedades físicas, químicas e mecânicas ao vidro, dependendo da percentagem com que cada um destes compostos é adicionado à mistura no lote a fundir. Na indústria vidreira estes são classificados segundo um critério empírico consoante a sua função no processo de fusão durante o fabrico de vidro, como vitrificantes, fundentes, estabilizantes e componentes secundários (outros) (Medici *et al.*, 2014).

Os vitrificantes são os óxidos formadores da rede vítrea, sendo o principal a sílica (SiO_2), os fundentes têm como função baixar o ponto de fusão da mistura a vitrificar, utilizando-se por norma os óxidos de metais alcalinos, de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O) e, por fim, os estabilizantes tais como os óxidos de cálcio (CaO), de magnésio (MgO) e de zinco (ZnO), têm como principal função atuarem como “pontes” entre dois ou mais iões oxigénio, conferindo maior resistência térmica, química e mecânica ao vidro garantindo, assim, a sua durabilidade (Velho, 2005; Medici *et al.*, 2014). Dentro desta classificação é usual ainda a utilização dos termos corantes e afinadores, opacificantes, entre outros, para os óxidos que desempenham uma função diferente no vidro conferindo-lhe também propriedades físicas distintas. Na Figura 8 podem-se observar algumas dessas funções para o conjunto de óxidos mais representativo na composição dos vidros.

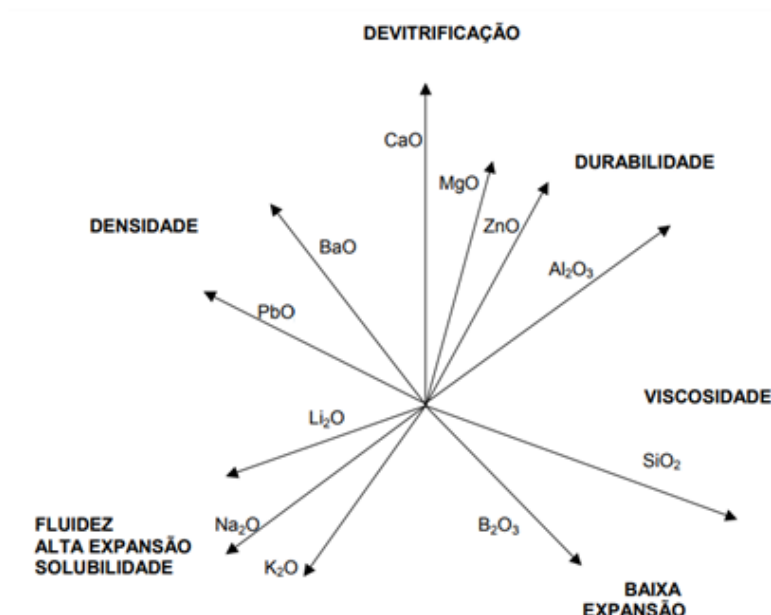


Figura 8 - Funções relativas dos óxidos no vidro (Adaptado de Akerman, 2000).

Todas as matérias primas de origem natural contêm geralmente minerais que, ao se juntarem à mistura, contribuem com uma proporção significativa de óxidos contaminantes se não existir um apertado controlo de qualidade. Tais minerais podem inviabilizar o produto final devido à sua presença em dimensões elevadas e/ou em grandes quantidades, o que pode levar a mudanças de propriedades e/ou danos por inclusões no vidro, respetivamente. A Tabela 12 mostra as temperaturas de fusão de alguns compostos que podem estar presentes nas matérias primas, nomeadamente na areia siliciosa, o que é um aspeto e indicador importante na regulação dos fornos de produção de vidro.

Tabela 12 - Pontos de fusão aproximados de alguns compostos (Shapiro & Brannock, 1962).

Óxidos	Temperatura de fusão (°C)	Minerais/compostos	Temperatura de fusão máx (°C)
Al ₂ O ₃	2040	Albite	1118
BaO	1925	Anortite	1550
CaO	2570	CaO-K ₂ O-SiO ₂	1630
Cr ₂ O ₃	1990	CaO-Na ₂ O-SiO ₂	1047
Fe ₂ O ₃	1457	Cianite e polimorfos	Até 1305
Fe ₃ O ₄	1597	Cromite	1670
K ₂ O	750	Diópsido	1391
MgO	2800	Espinela	2135
MnO	1850	Feldspatos potássicos	1150
PbO	886	Ilmenite	1450
SiO ₂	1470	Titanite	1382
TiO ₂	1825	Zircão	1540
ZnO	1975		
ZrO ₂	2690		

A proporção de cada óxido na mistura condiciona o produto final em termos físicos, mecânicos, químicos e estéticos. Por exemplo, impõe ao produto final cor ou ausência dela, o que determina muitas vezes o tipo de aplicação, e consequentemente, o mercado para a sua utilização.

Na Tabela 13 podem-se observar as especificações britânicas que regulam as quantidades mínimas de sílica e máximas dos outros óxidos presentes, impostas às areias no fabrico dos vidros. Estas estão agrupadas em classes de A a G, consoante a sua qualidade.

Tabela 13 - Classificação das areias siliciosas para a fabricação de vidro tendo em conta a presença em alguns óxidos (BSI, 1998).

Classe	Aplicação (Produtos de vidro)	Composição Química (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
A	Vidro ótico e oftálmico	> 99.7	< 0.2	< 0.013	< 0.00015
B	Tableware	99.6 ± 0.1	0.2 ± 0.1	≤ 0.010	< 0.0002
C	Vidros borossilicato	99.6 ± 0.1	0.2 ± 0.1	≤ 0.010	0.0002
D	Recipientes de vidro incolor	98.8 ± 0.2	Nominal ± 0.1	≤ 0.03 ± 0.003	0.0005
E	Vidro plano transparente	99.0 ± 0.2	0.5 ± 0.15	0.10 ± 0.005	-
F	Recipientes de vidro colorido	97.0 ± 0.3	Nominal ± 0.1	0.25 ± 0.03	-
G	Vidro para fibras isolantes	94.5 ± 0.5	3.0 ± 0.5	0.30 ± 0.05	-

2.5.2.1 Vidros de recipiente e de cor

Atualmente, a maioria das grandes empresas produtoras de vidro utilizam duas matérias primas principais no fabrico do produto final: a areia e o casco. Este último compreende todo o tipo de vidro que é sujeito a processos de reciclagem após o término do seu ciclo de vida ou que, devido ao não cumprimento de requisitos de qualidade durante a inspeção, é rejeitado no final da linha de produção. Regra geral, a reciclagem aproveita vidro de embalagem colorido que se encontra fragmentado em contentores de reciclagem próprios para o efeito. Estes podem posteriormente ser processados e entrar no fabrico de novas formas de vidro ou noutro tipo de aplicações.

Os recipientes e as embalagens de vidro fazem parte de uma série de cadeias de valor, apoiando importantes setores económicos europeus como os do vinho, da cerveja e das bebidas

espirituosas, dos produtos farmacêuticos, dos perfumes e cosméticos e dos alimentos processados. Os produtos embalados em vidro são exportados massivamente e contribuem para uma balança comercial positiva entre a U.E. e o resto do Mundo de cerca de 21 mil milhões de Euros por ano. A indústria do vidro de embalagem envolve emprego direto para mais de 43 mil pessoas e representa cerca de 70% de toda a produção de vidro na Europa (20 milhões de toneladas). No entanto, o vidro para recipientes é concorrente de fábricas que cresceram próximo das fronteiras da U.E. que não estão sujeitas a custos adicionais por emissões de CO₂. Entre 1999 e 2016 surgiram catorze novos fornos nesses países limítrofes, enquanto que na U.E. fecharam nove fabricas e seis fornos (FEVE, 2016).

Nos últimos anos tem-se verificado que em todos os países da Europa que a proporção total de vidros de cor que se encontra reciclada é superior à do vidro incolor. Este facto é devido a uma evolução de comportamentos em consequência de campanhas de sensibilização para separação dos objetos de vidro dos restantes resíduos.

O vidro colorido é bem mais tolerante às impurezas do que o incolor, sendo que a areia siliciosa necessária ao seu fabrico é de baixa qualidade comparativamente à areia de alta qualidade utilizada para os vidros incolores. Daqui se conclui que a reciclagem tem afetado muito mais a exploração de matérias primas para o vidro de embalagem colorido do que para o incolor, uma vez que para este último as areias consumidas devem ser de elevada qualidade (Velho, 2005). A produção destas últimas é apenas acessível aos grandes produtores de areias siliciosas, que tenderão a crescer em detrimento de alguns pequenos produtores. De facto, uma vez que o aproveitamento do casco na produção de vidro reduz sensivelmente a necessidade de areias de pior qualidade, aqueles últimos serão progressivamente menos solicitados. Enquanto isso, o consumo de areia siliciosa de elevada qualidade nunca é afetado pela variação composicional dos diferentes tipos de vidros e, por outro lado, os excedentes de areia produzidos terão sempre facilidade de escoamento para outras indústrias.

Existe ainda um tipo de vidro que comercialmente é chamado de "vidro de cristal" quando possui altas percentagens em chumbo na sua composição ("Tableware"). Este produto tem geralmente muitas exigências quanto às matérias primas utilizadas, nomeadamente na areia onde é requerida a sua alta pureza, geralmente acima de 99,5% em SiO₂. Nesta categoria, são necessários por vezes vários compostos elementares, como algumas tintas à base de metais preciosos como o ouro (Au) que conferem ao vidro várias características óticas, que aliadas ao processo de molde artesanal (manual), justificam os elevados preços com que essas peças são comercializadas. Neste caso as cores, por se apresentarem em peças por vezes únicas, não têm um carácter tão depreciativo no vidro e aumentam até o seu valor comercial. Na Tabela 14 podem ser vistos alguns agentes corantes comuns e as cores que provocam nos vidros.

Tabela 14 - Corantes de vidro comuns. Adaptado de Sharma (1991).

Cor	Agentes corantes
Vermelho	CdO (1,4%); Se(1%)
Vermelho/Rubi	Au coloidal; CuO ₂
Amarelo suave	CeO ₂ (2%); TiO ₂ (2%)
Azul ("deep blue")	CoO (0,1%)
Azul marinho	CuO
Verde esmeralda	Cr ₂ O ₃ (0,15%); CoO (0,001%)
Âmbar	FeS (0,3%)
Amarelo/verde fluorescente	UO ₂
Preto	MnO ₂ + Fe ₂ O ₃
Descolorantes	MnO ₂ ; NiO; Se; C, S, etc

Nota: Estas cores e concentrações dependem da composição química total de cada tipo de vidro. As várias combinações possíveis de elementos e compostos podem gerar diversas cores.

3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

3.1 Regional

A zona de estudo situa-se na freguesia de Alpedriz, concelho de Alcobaça, distrito de Leiria, sendo abrangida pela folha 26-B da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000 (Alcobaça). Está inserida, do ponto de vista tectónico, no principal acidente figurado naquela carta, o vale tifónico, que se estende numa direção NE- SW por toda a carta continuando nas folhas imediatamente abaixo e acima da mesma, respetivamente 26-D e 22D. De acordo com França & Zbyszewski (1963), trata-se de uma estrutura em sinclinal associada ao diapirismo que, eventualmente, produziu e ativou falhas que levaram ao colapso desta porção de terreno e à criação de sub-bacias internas nesta área, devido ao movimento e migração de formações de elevada plasticidade e baixa densidade para as zonas de maior fraqueza estrutural e o consequente movimento ascendente das mesmas. A unidade estratigráfica correspondente a estas formações, de idade hetangiana, denomina-se de "Margas e calcários de Dagorda" (*Ibid.*).

A atividade diapírica associada a estas bacias internas no interior da bacia Lusitaniana, terá prosseguido até ao Paleogénico (Kullberg, 2000). Na Figura 9 está representado um corte geológico esquemático dos terrenos entre Nazaré e Alpedriz, onde se pode observar o vale diapírico da Nazaré, principal depressão da região, onde se encaixam pequenos cursos de água. Imediatamente à direita desta estrutura encontra-se o trecho poente do sinclinal de Alpedriz-Porto Carro.

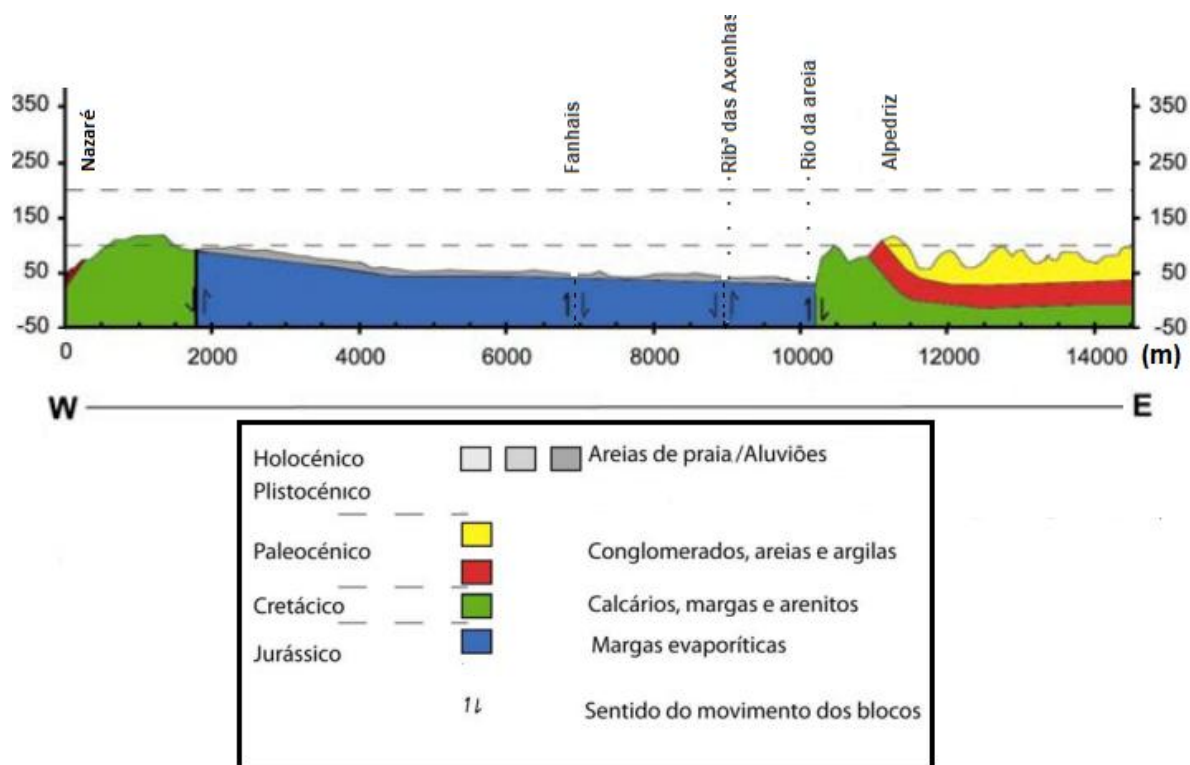


Figura 9 - Perfil Geológico e legenda representativos do corte Nazaré - Alpedriz. Modificado de Ramos (2008).

Os terrenos superficiais inserem-se, em termos estratigráficos, numa unidade datada do Plio-Plistocénico indiferenciado. Encontram-se depositados numa faixa paralela à linha de costa, a ENE da Nazaré. São constituídos por um complexo predominantemente arenoso, amarelado a avermelhado datado, em grande parte, do Pliocénico marinho e assentam transgressivamente sobre terrenos do Hetangiano e outros muito mais recentes (França & Zbyszewski, 1963). A presença de cascalho e lignito intercalados nas areias em estudo confirma também a existência de fases alternantes de deposição continental e marinha no Plio-Plistocénico, típicas desta época.

Na carta geológica 26-B (Alcobaça) os materiais com potencial de exploração pertencem às *Formações astianas de Famalicão, de Manges e de Salir do Porto e «Complexo arenoso de Valado dos Frades»*. (Ver Figura 10). Litologicamente, as areias em estudo são de cor beije a amarela, com relativa homogeneidade quanto à composição e tamanho das partículas essencialmente quartzosas e não cimentadas. As tonalidades mais escuras são dadas essencialmente pela presença de pequenos teores de argilas e de outros minerais.

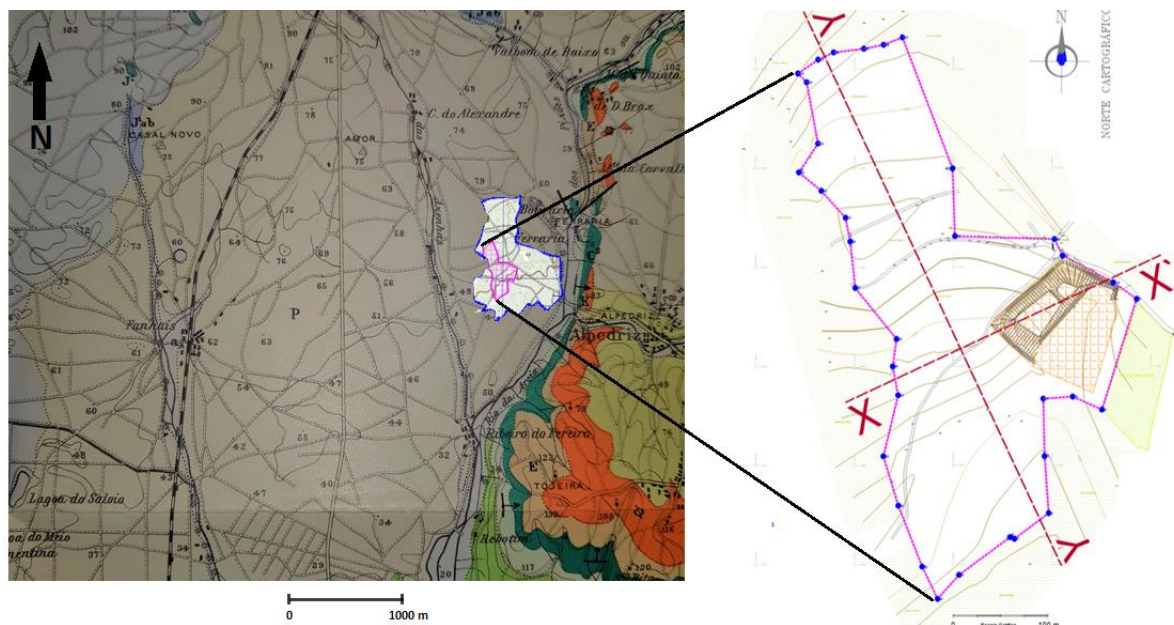


Figura 10 - Extrato da folha 26-B da Carta Geológica de Portugal (Alcobaça), com a localização da zona de estudo (área a cor de rosa) e respetiva planta topográfica. Área de aproximadamente 8.6 hectares.

Imediatamente abaixo daquelas areias siliciosas ocorre uma camada de areias avermelhadas, mais coeso e cimentado e com um teor em argilas visivelmente superior, podendo este ser um limite importante na caracterização deste complexo com elevada predominância arenosa. Não tendo sido possível fazer a distinção entre os terrenos pliocénicos e plistocénicos nesta região, admite-se que aquelas areias avermelhadas possam eventualmente ter sido depositadas no Pliocénico superior num ambiente predominantemente marinho dada a sua aparente composição mais argilosa, enquanto que as areias siliciosas superiores, aqui em estudo, teriam sido geradas num ambiente de transição marinho para continental já durante o Plistocénico. Quando emersas, as areias poderiam ter sofrido seleção e lavagem, quando remobiliadas pelo vento em conjunto com a dinâmica dos rios próximos. Por fim a ocorrência de períodos com condições favoráveis à estabilização desta formação, por desenvolvimento de uma cobertura vegetal densa, possibilitaram a preservação destas unidades, a partir de uma génese semelhante à evolução das dunas eólicas na zona costeira entre a Figueira da Foz e a Nazaré, descrita por André, et al., 2009. Esta pode ser outra interpretação, ainda que não exista bibliografia disponível que corrobore este facto à escala regional, para a sucessão litológica descrita. Segundo informações obtidas no relatório de Almeida, *et al.* (2000), referente à região do sistema aquífero Caldas da Rainha - Nazaré, estima-se que esta formação plio-plistocénica deverá ter, no seu conjunto, entre 20 e 35 metros e assentar diretamente sobre o complexo evaporítico hetangiano.

A unidade em causa integra o sistema hidrogeológico da Nazaré, que abrange argilas por vezes com seixos, argilas lignitosas, calcários, grés, conglomerados e, principalmente, areias finas. Este conjunto de litologias constitui um sistema aquífero livre a confinado, com porosidade intergranular, de alta produtividade e relativamente importante a nível regional (*Ibid.*).

3.2 Local

O acesso à exploração em curso existente na zona de estudo foi o único meio direto para aceder aos terrenos em profundidade, a fim de observar a extensão das areias, eventuais limites litológicos bem como recolher algumas amostras.

Em geral, verificou-se existir uma primeira camada de solo maioritariamente arenoso, rico em restos de matéria orgânica (raízes), que tem espessura variável, normalmente não superior a 2 metros, nas zonas observadas e prospetadas. Abaixo deste, ocorre uma camada de areias siliciosas esbranquiçadas a amareladas, de grão médio, geralmente mal calibradas tendencialmente equigranulares e que podem ser observadas em profundidade. Esta apresenta espessuras observáveis, numa zona explorada a céu aberto, entre 12 e 14 metros.

Classificaram-se as camadas observáveis em três terminologias de acordo com a sua litologia, sendo estas: SP - Solo perturbado (superfície), para o solo de cobertura que surge entre os primeiros dois metros a partir da superfície; AS - Areias siliciosas (topo), o material de interesse para extração; e AAA - Areias argilosas alaranjadas para a camada que ocorre na base da exploração e marca a passagem da camada de material AS para as areias alaranjadas, algo argilosas já referidas em secção anterior (3.1).

Um poço aberto a partir deste último nível litológico mostra a presença de água a 3,4 m abaixo do nível de fundo da exploração, ou seja, a cerca de 18-19 metros de profundidade relativamente à superfície topográfica original (Figura 11).



Figura 11 - Zona atualmente em exploração integrada na área de estudo - "Areiro Camarão 4".

4 MÉTODOS

Para caracterizar o local de estudo foram realizados trabalhos de prospecção sísmica de refração e recolhidas amostras compósitas de areias. A prospecção sísmica teve por objetivo a construção de um modelo geológico da subsuperfície e estimar o volume de areias que podem ser exploradas (recurso). As amostras de areia foram analisadas do ponto de vista granulométrico, mineralógica e químico. Na Figura 12 mostra-se um fluxograma que sintetiza os trabalhos de campo realizados no local e os trabalhos de gabinete assim como a ligação com os resultados.

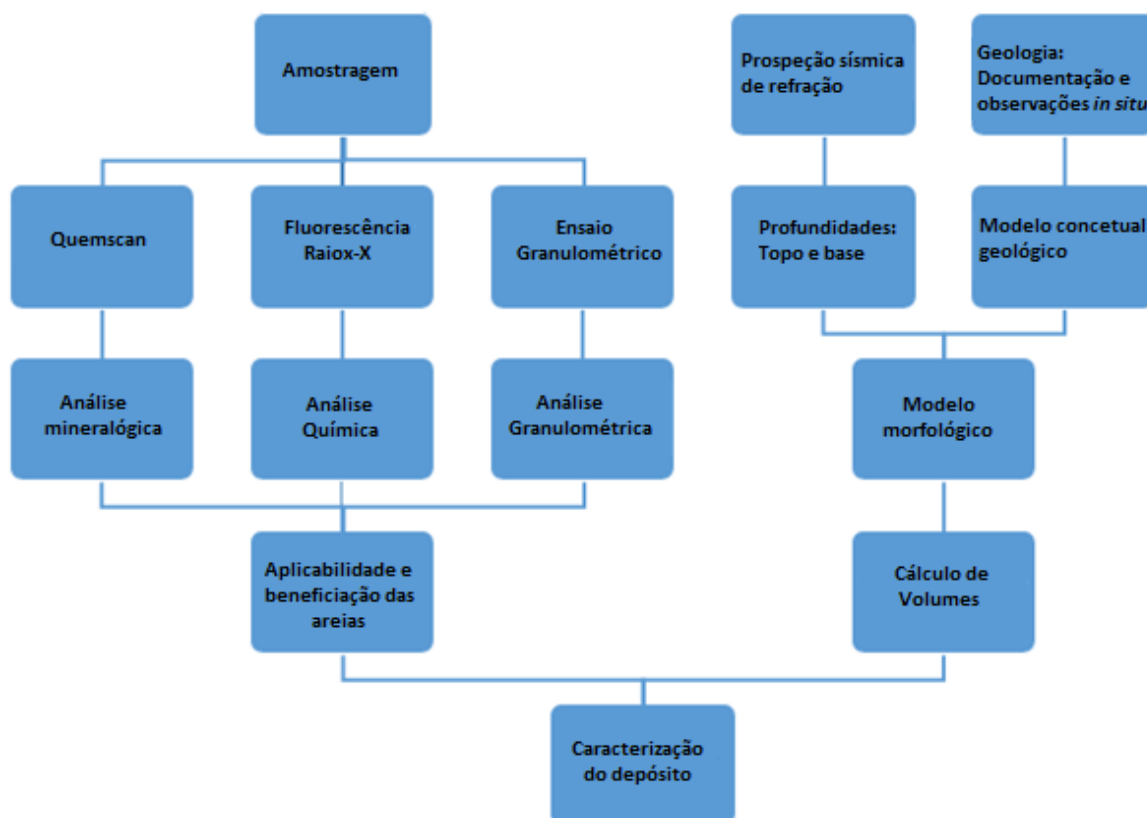


Figura 12 - Fluxograma que sintetiza os trabalhos de campo realizados no local e os trabalhos de gabinete assim como a ligação com os resultados.

4.1 Ensaio granulométrico

O ensaio granulométrico é um procedimento laboratorial que serve para determinar, por peneiração, a distribuição do tamanho dos grãos constituintes de um material granular. É um ensaio muito utilizado em engenharia geológica, principalmente na classificação e avaliação das propriedades de solos em diversos tipos de obras geotécnicas ou na utilização de agregados como materiais de construção ou de enchimento. Uma das instituições que serve como

referência para a elaboração deste tipo de ensaios é a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), cujas malhas de peneiros são comumente utilizadas para caracterizar vários tipos de materiais.

As frações retidas nos peneiros #40, #60 e #140 abrangem as dimensões geralmente aceites pela indústria vidreira (Tabela 15). Para além dos peneiros #40, #60 e #140, nestes estudos são utilizados outros equipamentos de laboratório: agitador de peneiros, estufa para desumidificação, balança de precisão centesimal, e almofariz com pilão de borracha para desagregar algumas amostras.

Tabela 15 - Peneiros ASTM utilizados no ensaio granulométrico.

ASTM - Peneiro (#)	Abertura (mm)	Areia para vidro (fração retida)
4	4,750	
10	2,000	
20	0,850	
40	0,425	Sim
60	0,250	Sim
140	0,106	Sim
200	0,075	
Refugo	<0,075	

O erro associado a estes ensaios granulométricos em areia deve-se, por regra, às perdas de finos durante a colocação e extração da amostra de areia nos peneiros, mas também à retenção de algumas partículas de diferentes dimensões nas malhas dos peneiros. O erro percentual associado a tais perdas pode ser calculado da seguinte forma, onde M_i e M_f são as massas inicial e final da amostra, respetivamente:

$$Erro (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

4.1.1 Módulo de finura

O módulo de finura (MF) é uma grandeza adimensional que permite determinar um tamanho nominal médio dos grãos de areia. Este parâmetro, necessário no cálculo da granulometria dos agregados para a indústria da construção, pode ser avaliado da forma mais usual com recurso à norma NP EN 126:2002+A1 2010. Fornece indicações sobre o comportamento de um betão constituído por vários tipos de agregados antes da sua fabricação, bem como sobre as quantidades de cimento e água necessários para obter uma mistura eficaz e consequente trabalhabilidade. Para calcular o MF somam-se as percentagens retidas e

acumuladas em cada peneiro da série principal da ASTM até ao peneiro #100, inclusive, e divide-se o resultado por 100:

$$MF(NP) = \frac{\sum_{k=\#i}^{\#j(*)} \text{Material retido acumulado total}(\%)}{100} \quad (2)$$

(*) até ao peneiro #100, inclusive

O resultado do MF pode ser interpretado como um indicador da dimensão média dos grãos, onde um MF igual a 1 corresponde ao peneiro #100 (0,149 mm de abertura), 2 ao peneiro #50, 3 ao peneiro #30, e assim sucessivamente, caso sejam utilizados os sucessivos peneiros da série principal da ASTM.

Para estudos que não envolvam os agregados para construção, é conveniente juntar ao ensaio alguns peneiros que estejam mais relacionados com dimensões desejáveis nessa perspetiva industrial. Para aplicações industriais, como a do vidro e da fundição, é necessário detalhar as frações entre os peneiros #20 (abertura 0,85 mm) e #140 (abertura 0,106 mm).

4.1.2 Índice de finura

O Índice de Finura (IF), proposto pela *American Foundrymans Society (AFS)*, é utilizado na classificação da areia para moldes na indústria da fundição e pode ser determinado com recurso às especificações dessa entidade. A fórmula para o cálculo deste índice de finura, é expressa pelo somatório do material retido (%) em cada peneiro (ASF), ponderado por um coeficiente e dividido pela soma total do material retido (%):

$$IF(AFS) = \frac{\sum_{k=0}^n (\text{Material retido}_k(\%) \times \text{Coeficiente})}{\sum_{k=0}^n \text{Material retido acumulado total}(\%)} \quad (3)$$

Para a determinação deste índice, no presente trabalho, utilizam-se os peneiros da série ASTM, alguns dos quais estão abrangidos pela série recomendada pela ASF. Na Tabela 16 - assinalam-se a azul os peneiros utilizados e respetivos coeficientes de ponderação segundo a AFS. Para o cálculo do IF é então feita uma média amostral, da qual resultou a combinação do ensaio granulométrico das três amostras 1, 2 e 3.

Para os peneiros #10 e #60, os coeficientes de ponderação foram calculados fazendo uma regra de proporcionalidade com os peneiros imediatamente anterior e o seguinte. Os peneiros #12, #30, #70 e #100 e #270 não foram utilizados. Em substituição a estes dois últimos utilizaram-se as pequenas percentagens retidas no prato (refugo) para o cálculo do IF (AFS).

Tabela 16 - Peneiros e coeficientes ASF originais e ponderados para peneiros intermédios.

Peneiros (#)	Malha nominal (mm)	Coeficiente	Proveniência do coeficiente
6	3,36	3	ASF
10	2,00	4,33	Ponderado
12	1,78	5	ASF
20	0,850	10	ASF
30	0,59	20	ASF
40	0,425	30	ASF
50	0,300	40	ASF
60	0,250	45	Ponderado
70	0,210	50	ASF
100	0,150	70	ASF
140	0,106	100	ASF
200	0,075	140	ASF
270	0,053	200	ASF
Refugo	0,000	300	ASF

4.2 Espectrometria de fluorescência de Raios-X (XRF)

A espectrometria por fluorescência de Raios-X é uma técnica que permite fazer uma análise qualitativa e quantitativa de um material, identificando os elementos presentes e estabelecendo a sua proporção relativa.

O princípio base para analisar um material utiliza geralmente uma fonte de radiação X (feixe de Raios-X) com uma energia suficiente para provocar a excitação dos átomos do composto em análise (transição para um nível de energia superior). Estes, após absorverem essa energia sob os fotões do feixe de radiação, ficam num estado excitado, que é instável. Por consequência, é necessário que ocorra o processo de desexcitação para um nível de energia inferior e a consequente emissão de Raios-X característica de cada elemento químico, o que permite identificar e quantificar os elementos que entram na composição de uma dada amostra.

Neste trabalho foi utilizado um espectrómetro de fluorescência de Raios-X de marca *Thermo Scientific Niton XL3p X-Ray* (Figura 13) com recurso a uma atmosfera de gás hélio em substituição ao ar presente no tubo da radiação X de forma a possibilitar a deteção de elementos leves tais como o alumínio, fósforo, magnésio e silício e outros importantes para a caracterização deste tipo de amostras.

As principais desvantagens deste método de análise química do material em estudo, prendem-se com três principais fatores, apresentados de seguida:

- a) Os elementos com baixo número atômico apresentam uma sensibilidade analítica baixa e reduzido valor de energia de emissão, o que dificulta a sua determinação;
- b) A sensibilidade para baixos valores de abundância relativa (inferiores à parte por milhão) é fraca;
- c) O possível efeito de matriz, interferências entre elementos dentro da amostra, provoca por vezes erros consideráveis nas leituras dos elementos Si, Al e Fe (Nagata *et al.*, 2001).



Figura 13 - Espectrómetro de fluorescência de Raios X utilizado. Modelo: Thermo Scientific Niton XL3t X-ray. Fonte: www.thermofisher.com

De facto, o espectrómetro apresentado tem como principal inconveniente o elevado limite de deteção (*LOD*) de alguns elementos, o que gera incerteza em relação à real presença destes na amostra. Assim, pode prejudicar a deteção dos elementos Arsénio, Zinco, Manganês, Enxofre, Fósforo e Cloro nas amostras analisadas se estes se apresentarem em concentrações abaixo do *LOD*.

Na preparação da amostra para determinação elementar pelo método XRF adotou-se a seguinte metodologia:

1. Quarteamento das amostras;
2. Moagem com recurso a um moinho de bolas planetário (alta energia);
3. Preparação da amostra pulverizada e prensada em recipientes cobertos com película;
4. Análise por XRF para deteção total de elementos constituintes.

Mais alguns detalhes da análise e preparação de amostras de areia siliciosa, bem como algumas metodologias propostas para analisar a presença de alguns elementos menores, porém de importante quantificação para a indústria, podem ser encontrados em Buhrke *et al.* (1997).

4.3 Avaliação Quantitativa de Minerais por Microscopia Eletrónica de Varrimento

QEMSCAN[®] (*Quantitative Evaluation of Materials by Scanning*) é um sistema automático de petrografia com uma extensa base de dados mineralógica que permite a identificação de minerais e outros compostos *in situ*. Trata-se de um sistema de análise de imagem baseado num microscópio eletrónico de varrimento (SEM) ao qual se associa um conjunto de detetores de espectroscopia de Raios-X de energia dispersiva (EDX). Por fim, com o apoio de numa base de dados é possível a identificação dos diferentes minerais presentes numa dada amostra. É uma ferramenta mais rigorosa e completa, quando se desconhece a composição e forma do material estudo, em comparação com métodos tradicionais de identificação mineralógica como a difração de Raios-X. Atualmente tem vindo a ser cada vez mais empregue na indústria petrolífera, na dos minerais industriais e noutros tipos de matérias-primas (SGS, 2017).

4.3.1 Avaliação mineralógica

A análise por QEMSCAN, da empresa Rocktype Ltd., segue a seguinte metodologia descrita e ilustrada na Figura 14:

- I. A amostra de areia é colocada num cilindro, envolvida por resina epóxi, e cortam-se as faces de modo a ter uma zona de observação e análise com 15 por 15 mm;
- II. Durante 10 minutos um feixe de eletrões varre a área de observação e produz sinais de eletrões de retrodifusão (*BSE*). Os valores de *BSE* retornados pelas áreas preenchidas com resina são muito baixos e estas áreas são logo excluídas da análise;
- III. As regiões com valores elevados de *BSE* são reexaminadas por um feixe de eletrões que permanece em cada ponto de análise enquanto que os detetores de Raios-X de energia dispersiva (EDX) gravam os Raios-X emitidos;
- IV. O sinal analógico dos detetores EDX passa para uma unidade de processamento que constrói uma curva de espectro de Raios-X, para cada ponto analisado;
- V. As curvas de espectro de Raios-X são comparadas com os registos de uma extensa Base de Dados e então cada curva é convertida para um mineral mais provável. O resultado desta conversão é uma imagem dos minerais presentes na amostra. As áreas com baixo valor de *BSE* são apresentadas como fundo e vazios entre os grãos.

- VI. As imagens mineralógicas são finalmente utilizadas para construir histogramas e tabelas de frequência dos minerais presentes, que são também apresentados como resultados.

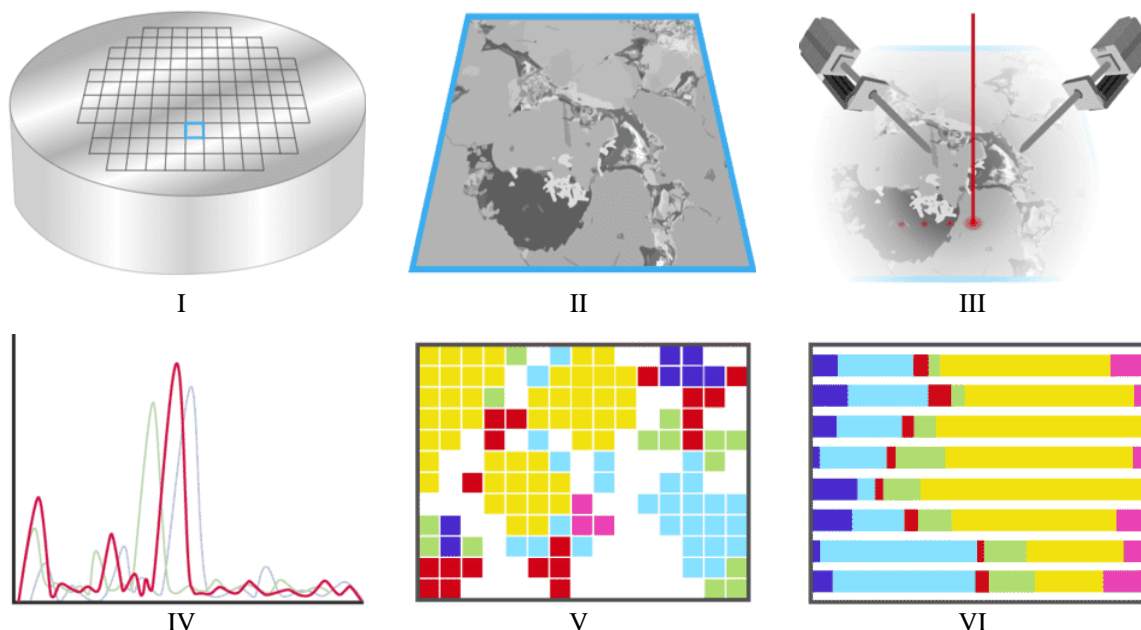


Figura 14 - Esquema ilustrativo do método *QEMSCAN*. Fonte: <http://rocktype.com/qemscan-technology/>.

4.3.2 Morfometria 2D

Um dos aspetos positivos da *QEMSCAN* é o facto de se analisar uma amostra sem ser necessária a sua destruição. O microscópio eletrónico de varrimento conjugado com a espectroscopia de energia dispersiva de Raio-X, para além da identificação dos minerais também digitaliza a superfície da amostra, cuja análise cuidadosa permite determinar propriedades relacionadas com o tamanho e a forma das partículas da areia.

A forma e a superfície específica das partículas de areia influenciam significativamente o processo de fusão no fabrico de vidro e as propriedades dos moldes de fundição, pelo que a avaliação e estudo da forma dos sedimentos que compõem a areia torna-se importante na sua caracterização antes de aplicada num processo industrial.

Um dos parâmetros de estudo possíveis através da análise das imagens obtidas é a classe de rolamento, importante na descrição e classificação de sedimentos. Este estudo é também importante a nível industrial, uma vez que dá uma ideia do rolamento das partículas, tendo em conta a esfericidade e angulosidade. Segundo Dias (2004), neste tipo de estudos de morfometria não se devem misturar, para uma dada avaliação de classe, grãos de frações granulométricas diferentes, uma vez que o grau de rolamento tende a diminuir à medida que os grãos se vão tornando menores. Utiliza-se a mesma espécie mineral para cada análise, normalmente o

quartzo. No entanto, dada a aplicação industrial das areias siliciosas e a eventual presença de certos minerais prejudiciais na composição final da matéria prima, pode fazer-se uma análise morfométrica sem exclusão de qualquer mineral existente na amostra. A projeção 2D definida por Powers em 1953, baseada na morfologia dos grão de quartzo (Figura 15), permite a análise da classe de rolamento dos grãos que constituem uma areia.

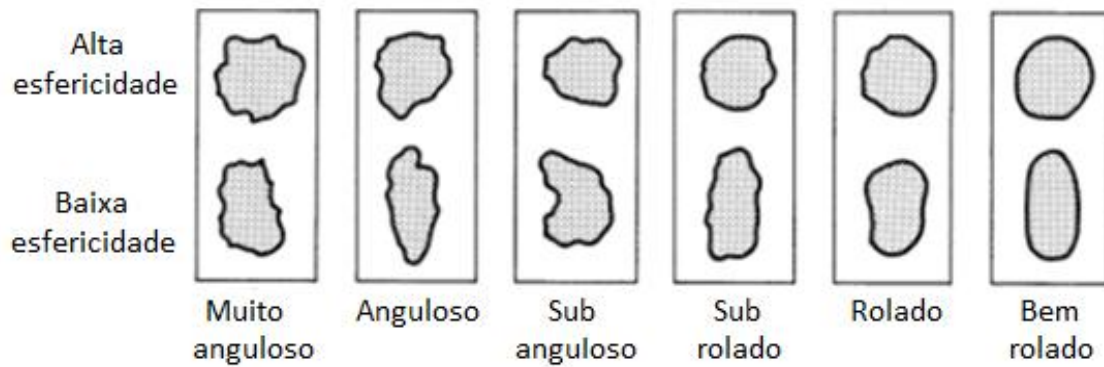


Figura 15 - Exemplo da projeção 2D das classes de rolamento. Adaptado de Powers (1953) *apud* Pye & Tsoar, (2008).

Em termos de metodologia, determinou-se a classe de rolamento do material recorrendo a uma seleção 100 grãos de areia. Para tal, uma malha regular foi sobreposta à imagem *QEMSCAN* para a seleção das partículas. A classe de rolamento média da areia ($Cr_{média}$), aplicando os fatores de Powers é dada pelo somatório da multiplicação da frequência dos grãos pertencente a cada uma das 6 classes de rolamento (f) pelo respetivo fator (F), dividido pelo número total de grãos analisados, neste caso 100, como podemos ver na seguinte expressão:

$$Cr_{média} = \frac{\sum_{i=1}^6 (f_i \cdot F_i)}{100} \quad (4)$$

Para facilitar a classificação da classe de rolamento de cada grão, atribuiu-se valores numéricos de 1 - muito angularo a 6 - bem rolado, seguindo a ordem das classes de projeção de Powers (Tabela 17).

Tabela 17 - Fatores estatísticos propostos por Powers para o cálculo da classe de rolamento das partículas (**F e f**) e classificação numérica atribuída.

Classe de rolamento	Classificação numérica atribuída	Fator (F)	Frequência por classe de rolamento (f)
Muito angularo	1	0,14	9
Angularo	2	0,21	21
Sub-angularo	3	0,30	31
Sub-rolada	4	0,41	24
Rolada	5	0,59	12
Bem rolada	6	0,84	3

Um dos gráficos 2D mais utilizados na avaliação de areias para a fraturação hidráulica é o de Krumbein & Sloss (1960) apresentado na Figura 16. A análise deve ser feita em 3D com o auxílio de uma lupa binocular ou softwares que permitam esse tipo de estudos.

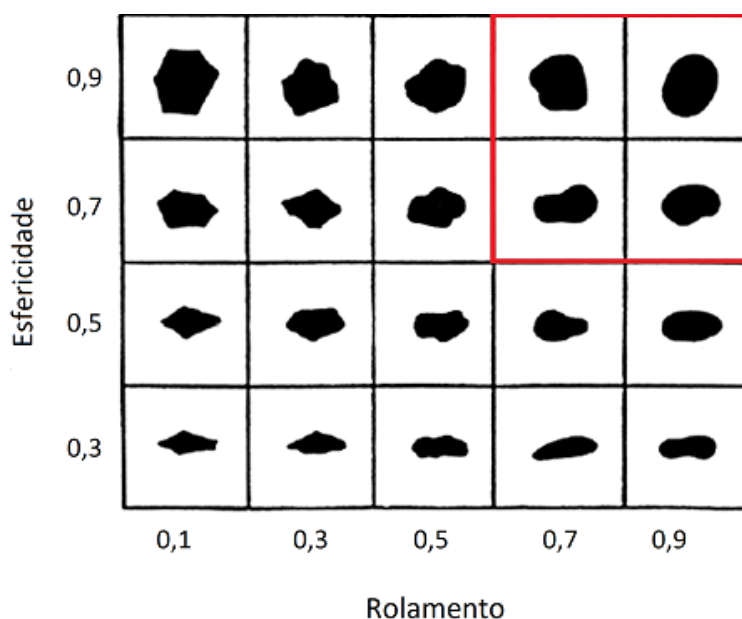


Figura 16 - Morfologia e parâmetros analisados dos grão de areia de fraturação (propante) Krumbein and Sloss (1960) *apud*. Mitchell (2015).

O resultado desta análise deve revelar valores superiores ou iguais a 0,6 para os parâmetros de esfericidade e rolamento dos grãos de areia de quartzo, em simultâneo.

4.4 Sísmica de refração

Os métodos sísmicos de prospeção são técnicas indiretas que utilizam a propagação de ondas mecânicas através do meio geológico tendo em vista a sua interpretação a diferentes escalas: global, crustal e subsuperficial, sendo este o método geofísico que mais vem contribuindo para a compreensão da estrutura do planeta, através da análise das ondas provenientes de sismos ou da detonação de explosivos provocada voluntariamente. A discussão relativa à refração sísmica a nível da tectónica global, geralmente baseada em estudos de sismicidade, pode ser encontrada nos trabalhos de Kearey *et al.* (2009), entre outros autores.

A refração sísmica, pode ser executada a partir da superfície ou em furos de sondagem para investigar profundidades por regra reduzidas, e é geralmente uma ferramenta indispensável na prospeção geológica no contexto de obras geotécnicas ou mesmo na exploração de georrecursos minerais e energéticos.

Na sísmica de refração à escala subsuperficial, as ondas sísmicas são geradas a partir de uma fonte de energia que pode ser reproduzida no solo através do impacto de um martelo ou de

uma pequena detonação. As ondas geradas propagam-se em profundidade e regressam à superfície por refração após atingirem o ângulo crítico (θ_c), que permite que as mesmas se propagem ao longo da interface entre dois meios diferentes, desde que entre ambos exista um contraste de impedância acústica significativa. Deste modo ocorre o regresso à superfície das ondas refratadas a partir do mesmo ângulo de entrada nesse meio (Figura 17).

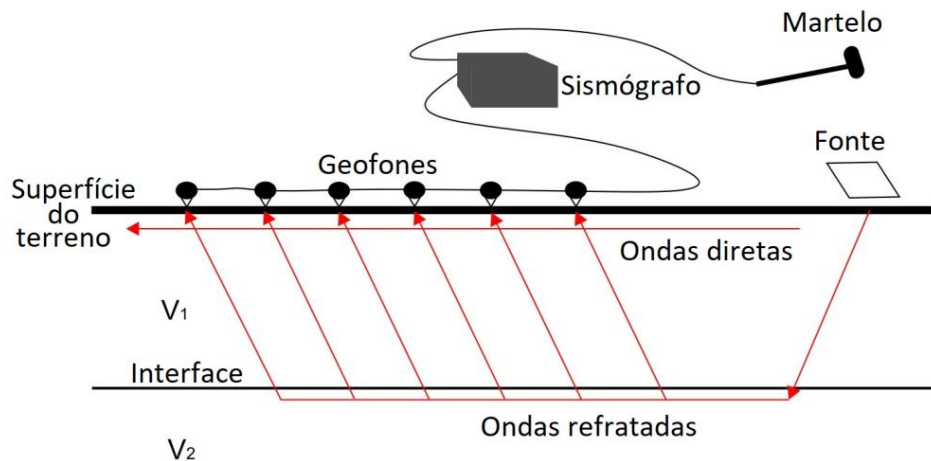


Figura 17 - Propagação de uma onda sísmica por refração após atingir o ângulo crítico, até atingir de novo a superfície.

Por dedução através da Lei de Snell, que relaciona o ângulo de incidência com o ângulo de transmissão, este ângulo crítico (θ_c) pode ser calculado da seguinte forma:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

No entanto, este método apresenta na prática alguns inconvenientes que estão geralmente relacionados com determinadas características dos locais em estudo, sendo mais apropriada a sua aplicação sob determinadas condições que minorem os erros de interpretação. Tais limitações foram tomadas em consideração no estudo desenvolvido, sendo seguidamente apresentadas:

- A não ser que acompanhado por topógrafo e respetivo equipamento, um perfil sísmico deve ser executado em terreno o mais horizontal possível;
- A identificação das interfaces entre meios de diferentes velocidades em profundidade é difícil se as mesmas não forem planares ou próximas disso;
- O comprimento do perfil e a energia gerada na fonte (Tiro) devem ser tais que seja possível alcançar a profundidade desejada;

- O ruído envolvente durante o dia deve ser reduzido ou evitado (se possível, aguardar que a fonte desse ruído, um veículo, um avião, etc., se afaste). Em alternativa, será necessário realizar o perfil à noite;
- Para uma correta interpretação no sismograma da chegada da onda ao primeiro geofone, o mesmo não deve estar afastado da fonte em menos de 5 m.
- A velocidade de propagação das ondas sísmicas deve aumentar com o aumento da profundidade, isto é, o método não dá resultados corretos se existirem camadas ocultas de velocidades de propagação menores subjacentes a meios de velocidade maiores.

Os resultados da velocidade das ondas sísmicas P, as comumente utilizadas em estudos de refração, permitem após a análise, determinar profundidades de escavação, detetar o *bedrock*, avaliar parâmetros construtivos como a ripabilidade, entre outras aplicações. A norma ASTM para a realização de sísmica de refração, indica também valores de velocidades para as ondas P consoante os materiais solos ou rochas que estas atravessam (Tabela 18).

Tabela 18 - Faixa de valores para as ondas P em solos e rochas. Adaptado de ASTM, (2000).

Material	Velocidade das ondas P (m/s)
Solo superficial perturbado	240 a 610
Cascalho ou areia seca	460 a 915
Areia (saturada)	1220 a 1830
Argila (saturada)	915 a 2750
Água (doce a salgada/oceânica)	1430 a 1665
Arenito	1830 a 3960
Xisto	2750 a 4270
Cré - calcário pulverulento	1830 a 3960
Calcário	2134 a 6100
Granito	4575 a 5800
Rochas metamórficas	3050 a 7000

Para a área de estudo, a base dos trabalhos consistiu na determinação de pequenos desvios nos tempos de chegada das ondas P através do programa de interpretação de sismogramas (*SismoLPC*), para posteriores cálculos a partir do software *Microsoft Office Excel*. Para tal foram utilizados, um sismógrafo de marca PASI, modelo 12S12L, 12 geofones padronizados para detetar a chegadas das ondas sísmicas, um martelo de 10 kg para provocar vibrações no terreno (fonte de energia), uma massa de aço destinada a concentrar a energia do impacto do martelo, fita métrica e corda para efetuar medições e manter o alinhamento entre os geofones e a fonte de energia. Por fim, estacas de madeira, fita de sinalização e GPS para preservar e localizar no terreno os pontos extremos dos perfis sísmicos.

O software do sismógrafo regista desvios temporais da chegada das ondas sísmicas a cada geofone, ou seja, zonas onde as velocidades das ondas transmitidas aumentam com a profundidade, correspondentes a interfaces entre meios de distintas litologias, graus de alteração, compacidades, etc.. Essas variações de velocidades são representadas graficamente por meio de um conjunto de segmentos de reta de diferentes declives denominados de dromocrónicas. As velocidade de cada um dos meios detetados pode assim ser determinada relacionando a distância à fonte com tempo de chegada aos geofones. A metodologia utilizada após a aquisição dos dados para posterior interpretação é resumida nos seguintes quatro pontos, a saber:

1. O traçado das dromocrónicas realiza-se através da relação tempo de chegada da primeira onda aos geofones e a distância entre estes e a fonte de emissão;
2. O número de interfaces e as velocidades de propagação das ondas em cada meio são determinados com base nos declives de cada segmento de reta;
3. As distâncias entre a onda refratada à fonte de emissão, ou seja, os parâmetros X_c e X_1 são calculados com base na interseção das retas inclinadas Y_1 com Y_2 e Y_2 com Y_3 , respetivamente;
4. Por fim, a profundidade das interfaces, neste caso h_1 e h_2 , para cada tiro efetuado determinam-se através da aplicação das seguintes expressões, respetivamente:

$$h_1 = \frac{X_c}{2\sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}}} \quad (6)$$

$$h_2 = \frac{5}{6} h_1 + \frac{X_1}{2\sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}}} \quad (7)$$

4.5 Modelação geológica

A modelação geológica é cada vez mais popular na área das geociências, mesmo para empresas no sector extrativo de menor dimensão. Permite ao utilizador gerar e testar vários cenários bem como carregar, atualizar dados e construir representações 3D da morfologia de massas e depósitos minerais tendo em conta hipóteses e experiência de especialistas.

Os modelos geológicos podem ser classificados como deterministas ou estocásticos, conforme a natureza dos algoritmos utilizados na sua construção.

Os modelos deterministas são mais simples, dão sempre o mesmo resultado para cada conjunto de dados de partida, e não mostram a incerteza associada ao resultado. Geralmente

aplicam-se quando os dados são limitados e quando não é possível associar nenhuma estrutura de continuidade à variável em estudo (Goovaerts, 1997). Na construção de modelos geológicos por superfícies, são exemplos de abordagens deterministas para a interpolação de superfícies os polígonos de influência, a triangulação e o inverso da potência da distância. Estes métodos calculam a posição de uma superfície no espaço a partir dos valores observados nas imediações do local. Em particular, o estimador inverso da potência das distâncias suaviza a forma geométrica da superfície que é modelada ponderando as observações mais próximas em função da potência da distância (Figura 18). A potência 2 é a mais utilizada neste estimador e então o método designa-se por Inverso do quadrado das distâncias (IQD). Pode ser utilizado para interpolar ou extrapolar.

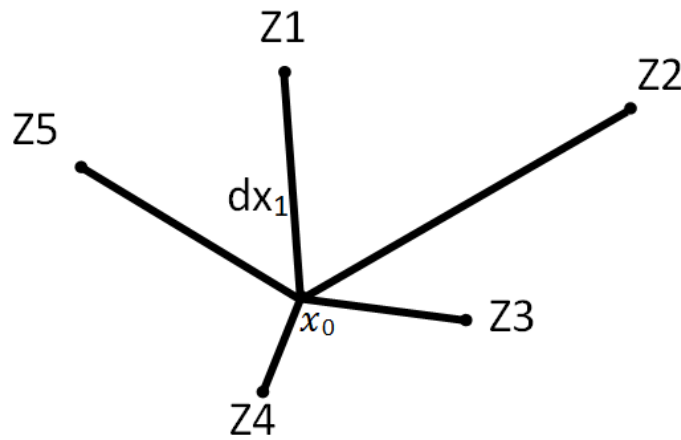


Figura 18 - Inverso do quadrado das distâncias. O valor em x_0 é dado pela média ponderada pelo inverso da potência da distância (dx dos vários pontos conhecidos (Z)).

A fórmula geral para a estimação de um ponto, a partir de valores conhecidos a determinada distância desse faz-se da seguinte forma:

$$z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{x_i}^p} z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{x_i}^p}} \quad (8)$$

onde, z_i : são os valores conhecidos; d_{x_i} : a distância das amostras a x_0 (ponto a estimar) e p : é a potência arbitrada.

Neste estudo procedeu-se à construção de um modelo morfológico de camadas aproximadamente horizontais tendo por base os resultados da prospeção sísmica. Foi utilizado o estimador IQD e as superfícies são aproximadas por um modelo celular (células de 5 metros de lado) e onde a posição na vertical é um atributo (cota).

Para a geração deste modelo de superfícies foi utilizado o software *Move*; para o tratamento dos dados resultantes da sísmica de refração e de medições de coordenadas na área utilizou-se o Excel. Com o modelo morfológico 3D representado por superfícies, é possível calcular os recursos (quantitativos) da camada de areias siliciosas assim como antecipar o seu potencial económico.

A sísmica de refração foi a principal informação de partida para a construção deste modelo geológico da morfologia das camadas de areias siliciosas. O resultado são a posição vertical das camadas ao longo de linhas com cerca de 65m de comprimento (linhas sísmicas). A prospeção sísmica permite o reconhecimento das transições entre camadas em profundidade, quando existem variações na velocidade de propagação das ondas sísmicas. A restante informação georreferenciada, nomeadamente limites identificados na zona já explorada do céu aberto, foram utilizados para calibrar a profundidade das interfaces sísmicas detetadas em relação às reais profundidades observadas. A partir das alturas $h1$ e $h2$ calculadas previamente, foi possível gerar um ficheiro de colunas x , y , z . Esta informação permitiu construir o modelo morfológico de três superfícies, assumindo valores dos grupos de pontos que representam cada horizonte do tipo (0;0;0) para a superfície topográfica ($x1$, $y1$, $h1$) para a base da camada de solo (SP) e ($x1$, $y1$, $h2$) para a base do recurso de areias (AS).

A estimação da posição das superfícies consistiu, na aplicação do estimador IQD ao espaço não amostrado agrupando-se todos os pontos do tipo (X , Y , $h2$) para estimar a base da camada e depois (X , Y , $h1$) para o topo. Com estes valores obtiveram-se dois horizontes de transição *(AAA-AS e AS-SP). Estas duas superfícies, juntamente com o topo ($Z=0$ m) e base ($Z=20$ m) do modelo constituem o modelo da área que inclui a área em estudo.

Cada par de superfícies delimita um volume, então no final são estimados os quantitativos de areias e de estéreis (solos) entre cada par de superfícies e para toda a área de estudo.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Amostragem

Nos taludes da escavação existente na área de estudo foram recolhidas três amostras de areia, a diferentes profundidades, com o objetivo serem representativas do material em exploração. A recolha das amostras foi feita no local apresentado na Figura 19 com recurso a uma pequena pá sob as condições observáveis na Tabela 19, removendo-se para tal os primeiros decímetros da face exposta, sujeita a eventuais contaminações com material proveniente das zonas superiores da escavação. Importa referir que não foi feita uma campanha exaustiva de recolha porque nas áreas por explorar existe uma espessa camada de solo vegetal e densa vegetação. Assim, uma análise espacial de teores com delimitação, em profundidade, de possíveis lentes de material de melhor ou menor qualidade química e granulométrica ficou excluída deste estudo.

Tabela 19 - Condições gerais de amostragem

Local	Areeiro Camarão 4 (Alpedriz)
Latitude / longitude	39° 37' 53.57" / 8° 57' 56.77"
Data	23/02/2017
Temperatura (aproximada)	14°C
Humidade(aproximada)	80%
Profundidade	Entre 2 e 15 m
Quantidade (aproximada)	2 kg por amostra



Figura 19 - Localização do ponto de amostragem sobre o ortofotomapa.

Na Tabela 20 indicam-se as amostras recolhidas, assim como os ensaios que foram efetuados.

Tabela 20 - Ensaios e análises efetuados nas amostras recolhida.

Amostra	Profundidade (m)	Estado da amostra de areia	Ensaios e métodos físicos / mecânicos	Análise química / mineralógica
1	Entre 5 a 6	1. <i>In situ</i> ; 2. <u>Processada</u>	1. Granulométrico, morfometria; 2. <u>Lavagem, crivagem e separação magnética</u>	1. <i>QEMSCAN</i> e <i>XRF</i> ; 2. <i>XRF</i>
2	Entre 7 a 8	<i>In situ</i>	Granulométrico	XRF
3	Entre 12 a 14	<i>In situ</i>	Granulométrico	XRF

Todas as amostras foram sujeitas a um ensaio granulométrico e a análises XRF sempre tendo em conta as suas características e todas as granulometrias *in situ* resultantes da amostragem. A amostra 1 foi sujeita ainda a uma análise morfométrica e mineralógica (QEMSCAN). Numa segunda fase esta mesma amostra (1) após um processamento (lavagem, classificação e separação magnética) foi ainda analisada com recurso XRF apenas sob as granulometrias crivadas entre]0,85; 0,125] mm.

5.2 Ensaio granulométrico e utilização industrial das areias

5.2.1 Perspetiva da indústria vidreira

Tendo em conta as características requeridas em termos granulométricos, valores base requeridos de um modo geral pela indústria vidreira foram testados e estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Resultados do ensaio granulométrico para as três amostras representativas da areia.

ASTM		Amostras (% de massa retida)			Massa retida (%) (média amostral)
Peneiro (#)	malha (mm)	1	2	3	
4	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2,00	0,01	0,09	0,00	0,03
20	0,85	3,54	5,49	6,64	5,22
40	0,425	19,68	24,27	28,61	24,18
60	0,25	52,44	55,94	44,56	50,98
140	0,106	24,14	13,78	20,13	19,35
200	0,075	0,14	0,22	0,02	0,12
Prato	<0,075	0,01	0,15	0,00	0,06
	Total	99,95	99,93	99,96	99,94
	Erro (%)	0,05	0,07	0,04	0,06

Nas três amostras verificou-se sempre um peso inferior a 0,2% na fração das argilas, valor que, na amostra 2, pode chegar a 0,23% caso o total de perdas durante o ensaio sejam perdas de finos inferiores a 0,075 mm. A classe granulométrica predominante é [0,106; 0,425] mm em todas as amostras com frequências relativas superiores a 64%, sendo que a percentagem de material retido nas classes no intervalo [0,106; 0,85] mm, adequadas da maioria das utilizações industriais vidreiras e de fundição, é em média 94,5% do material retido.

A fração de material cuja granulometria não entra geralmente normalmente nas indústrias aqui abordadas é no máximo 6,64 %, que fica retida acima dos 0,85 mm e que pode ser acumulada e destinada à indústria da construção civil; enquanto que o pouco material fino excluído das areias, para a indústria vidreira, é facilmente removido num processo de lavagem classificação através de um hidrociclone.

A distribuição granulométrica das amostras estudadas juntamente com a curva de distribuição, de Aydin (2000), preferida na indústria vidreira para as areias siliciosas para aplicação nos vários tipos de vidro: Recipiente colorido e incolor, plano transparente, borossilicatado e cristal de chumbo encontra-se apresentada na Figura 20.

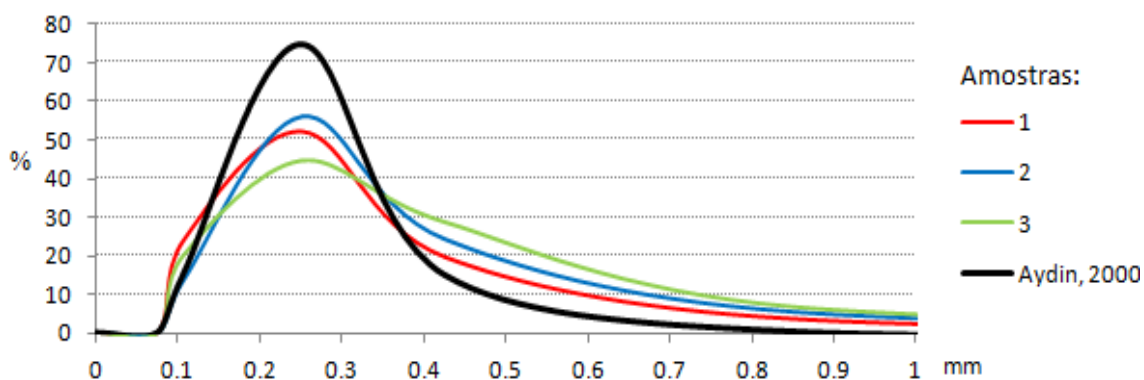


Figura 20 - Comparação da distribuição granulométrica das amostras relativamente à referida por Aydin, 2000.

A crivagem das areias aos 0,1 mm e aos 0,6 mm durante o processo de lavagem deve limitar a presença de partículas, respetivamente finas e grosseiras, que casualmente ocorram no terreno. A distribuição das amostras apresentada é também afetada pela ausência de peneiros entre 0,425 mm e 0,85 mm durante o ensaio granulométrico pelo que, após a adição de peneiros de 0,5 mm e 0,71 mm de abertura, a curva destas amostras se deve ajustar ainda mais à curva (parte direita) dada por Aydin.

5.2.2 Perspetiva de outras indústrias consumidoras

A areia em estudo pode ser classificada de *mal calibrada* devido à uniformidade de distribuição dos grãos, conforme fica patente na curva granulométrica apresentada na Figura 21.

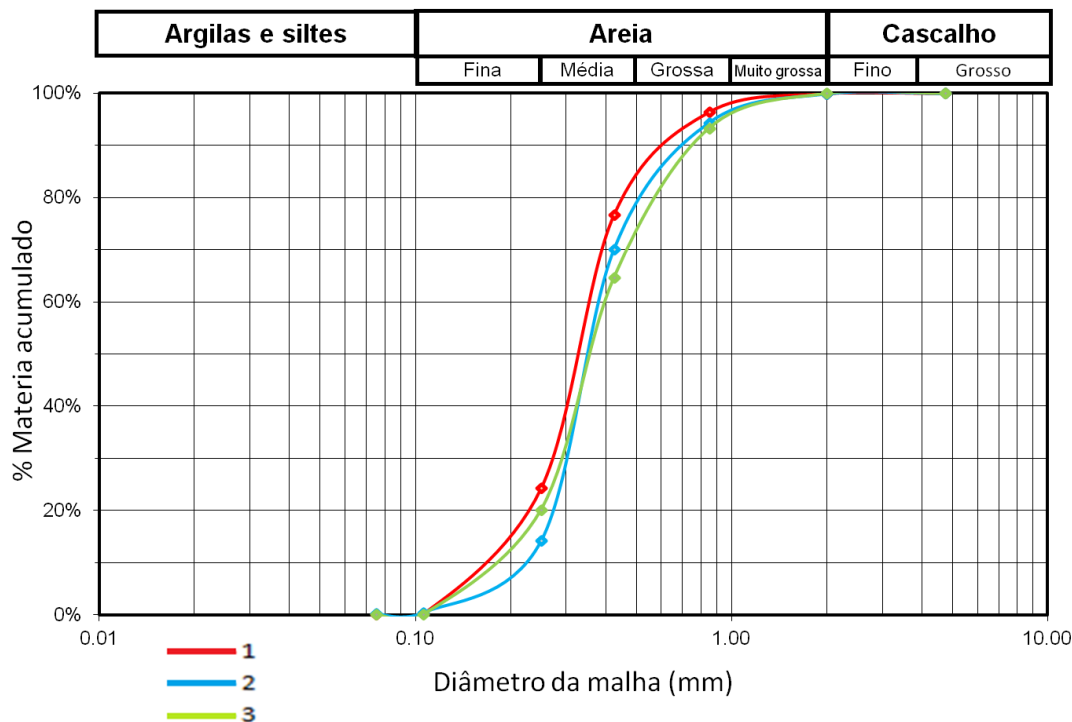


Figura 21 – Curvas granulométricas das três amostras recolhidas.

Um aspeto útil da crivagem de material aos 0,5 mm ou 0,6 mm referida anteriormente é que, mantendo-se um esquema de processamento tal como o da areia para o vidro, existe a vantagem de reservar uma determinada quantidade de areia que, depois de beneficiada até determinados graus de pureza, pode entrar nos intervalos de aplicação da fraturação hidráulica, ou seja nos intervalos [0,425; 0,85] mm ou [0,85-1,7] mm, referidos em Mitchell (2015) para a areia propante. Segundo Moura & Velho (2011) estas frações podem também ser aplicada como filtros em unidades de tratamento de águas residuais e piscinas que, em certos casos, utiliza granulometrias retidas entre 0,5 a 1 mm.

A Tabela 22 mostra o resultado da análise granulométrica em termos do cálculo do módulo e índice de finura; indicadores importantes na caracterização de areias para o fabrico de argamassas/betões e para a produção de moldes de areia.

Neste caso trata-se de um agregado fino, cujo o módulo de finura [MF(ASTM) = 2] indica a dimensão do agregado correspondente ao peneiro #60 (0,250 mm), segundo acima do #200. A ausência de finos, siltes e argilas (< 0,075 mm) permite a produção de betão mais

económico uma vez que a presença de finos implica maior consumo de água e cimento no fabrico de betão.

O índice de finura (IF/ASF) foi obtido para o conjunto amostral dividindo o Produto (a).(b) Total, pela percentagem de massa retida total. Permitiu discutir principalmente acerca das aplicações das areias nos moldes de fundição.

Tabela 22 - Módulo e índice de Finura ASTM e ASF, respetivamente.

Peneiro ASTM (#)	Malha (mm)	Amostra média (% massa retida acumulada)	Amostra média (% massa retida) (a)	Coeficiente (b)	Produto (a).(b)	MF (ASTM)	IF (ASF)
4	4,75	0,000	0,000	-	0,00	2,15 (2)	50,44 (50)
10	2,00	0,033	0,033	4,33	0,144		
20	0,850	5,253	5,220	10	52,199		
40	0,425	29,437	24,184	30	725,519		
60	0,250	80,415	50,978	45	2294,004		
140	0,106	99,762	19,347	100	1934,716		
200	0,075	99,887	0,124	140	17,427		
Prato	-	99,943	0,056	300	16,805		
Soma exclusive (#200 e Prato)	-	214,900	-	-	-		
Σ Total	-	414,730	99,943	-	5040,815		

O valor obtido para o Índice de finura, 50, indica que as areias analisadas são adequadas do ponto de vista da qualidade da distribuição granulométrica, para a indústria da fundição, principalmente em moldes para aço e ferro. Para este tipo de metais, a composição da areia necessita de poucos aditivos que compõem o molde de areia verde, como a bentonite e a água. Estes últimos compostos, quando adicionados à areia vão ainda aumentar mais o seu IF e melhorar as suas propriedades mecânicas. A utilização desta areia para metais como o alumínio e ligas de cobre é possível com uma certa proporção de ligante; porém para o fabrico tem se vindo a utilizar outros processos de molde que não os de areia.

5.3 Análise mineralógica

A análise mineralógica é obtidas através dos resultados da análise *QEMSCAN* e consiste numa imagem da superfície de corte polida dos grãos de areia. Essa análise é apresentada através de um código de cores conforme os minerais presentes nos grãos (um ou vários por grão) tal como se apresenta na Figura 22.

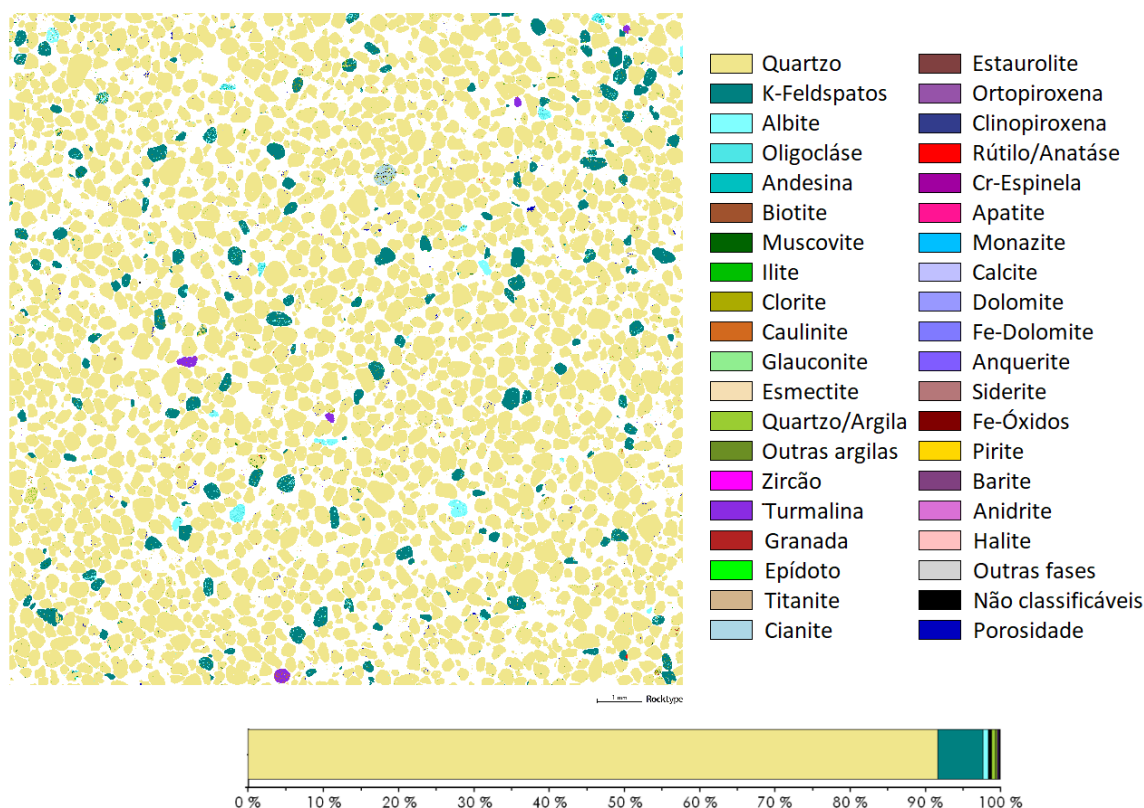


Figura 22 - Imagem de partículas da composição mineralógica modal (em baixo) e legenda de cores (à direita) da amostra de areia analisada.

Nesta amostra, o quartzo, mineral que é dominante na areia siliciosa, ocupa cerca de 92% do total. Para além deste mineral, destacam-se os feldspatos potássicos, que representam 6% do total da amostra, seguindo-se pouco menos 1 % tanto de plagioclases como de partículas argilosas muitas associadas a grãos de quartzo. Os restantes minerais, onde se destacam a turmalina, a cianite e algumas micas, representam perto 0,5% da amostra total (Tabela 23 e [Figura 23](#)). O resultado completo da análise mineralógica *QEMSCAN* desta amostra pode ser consultado no **Anexo 1**.

Tabela 23 - Composição mineralógica quantitativa *QEMSCAN*.

Mineral	%
Quartzo	91,78
Feldspatos potássicos	6,01
Argilas	0,94
Plagioclases	0,84
Turmalina	0,20
Cianite	0,11
Micas	0,06
Outros	0,06

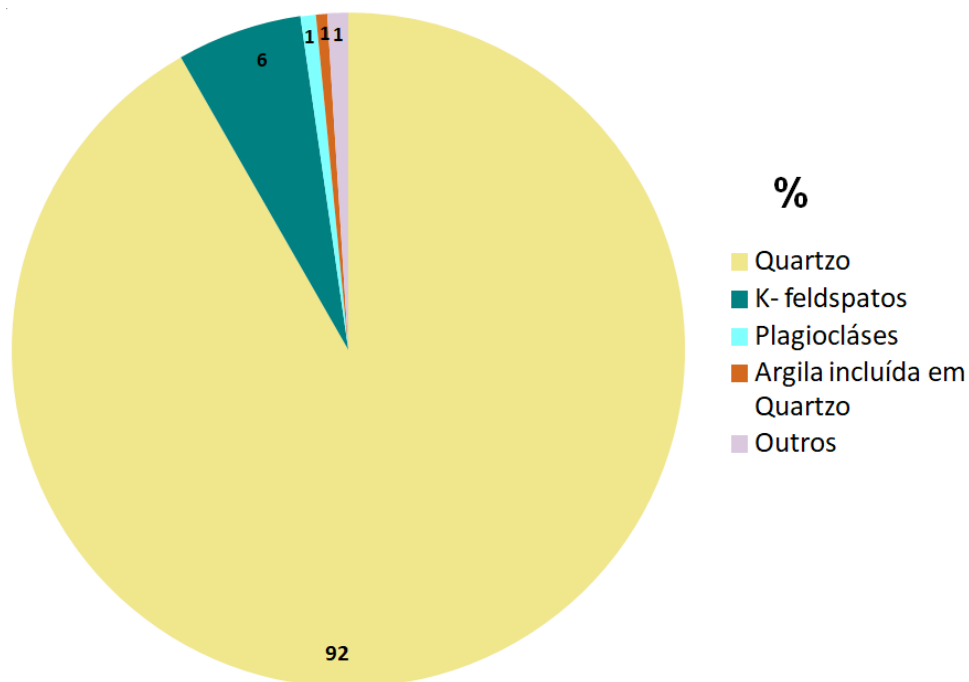


Figura 23 - Histograma circular da composição mineralógica total.

Analisando-se com mais detalhe a imagem *QEMSCAN* da Figura 22 é possível verificar alguns aspetos relativos à composição e morfologia dos grãos de areia que são demonstrativos das associações minerais ocorrentes, vistas como contaminantes a remover nestas areias:

- Associados aos grãos de quartzo surgem por vezes o rútilo e óxidos de ferro, porém estes ocorrem muito raramente incluídos e geralmente mais na superfície dos grãos;
- A cianite apresenta-se bastante alterada e contendo compostos não classificados por esta análise, bem como argilas e óxidos de ferro, sendo um dos principais minerais encontrados com estes óxidos;
- Mais expressiva é a presença de inclusões de argilas no quartzo que, ao serem compostas por óxidos de ferro, nomeadamente a ilite e a clorite, são prejudiciais ao vidro e podem mesmo impedir a aplicação das areias em setores desta indústria. As inclusões argilosas nos grãos de quartzo totalizam 0,54% enquanto que os restantes minerais argilosos presentes perfazem cerca de 0,40% da amostra.
- A turmalina é um dos minerais mais comuns, cuja dimensão dos grãos é da ordem de grandeza dos de quartzo. Este composto é um dos que contêm parte da percentagem de óxidos de ferro sendo, por este motivo suscetível a campos magnéticos.
- Os feldspatos potássicos (6,01%) são os contaminantes da areia com percentagem mais elevada que, juntamente com as plagioclases (feldspatos calco-sódicos), somam cerca de 7% do total da amostra.

Na Tabela 24 é apresentada a mineralogia principal da areia, no ponto de vista de quando se retira o quartzo da análise *QEMSCAN*:

Tabela 24 - Análise mineralógica quantitativa da areia, recalculada sem o mineral quartzo (em %).

Feldspatos potássicos	81,13
Plagioclases	10,86
Argilas	3,44
Turmalina	2,62
Cianite	1,46
Outros	0,49

As partículas minerais contaminantes identificadas podem-se classificar consoante a massa volúmica (g/cm^3) como pesadas (1) e leves (2) apresentadas na Figura 24; ou mistas (3) quando ocorrem associações mineralógicas:

1. Pesadas ($>2,9 \text{ g/cm}^3$): Fazem parte deste conjunto principalmente, a turmalina, rútilo/anátase, epídoto, apatite, zircão, monazite/xenótimo, granada, cianite, siderite e pirite e óxidos de ferro hidratados e estão relacionados com a fração mais fina; porém ocorrem partículas mais grosseiras de turmalina e cianite;
2. Leves ($<2,8 \text{ g/cm}^3$): Incluem os feldspatos potássicos e plagioclases, que se apresentam maioritariamente distribuídos ao longo da fração intermédia e mais grosseira das areias;

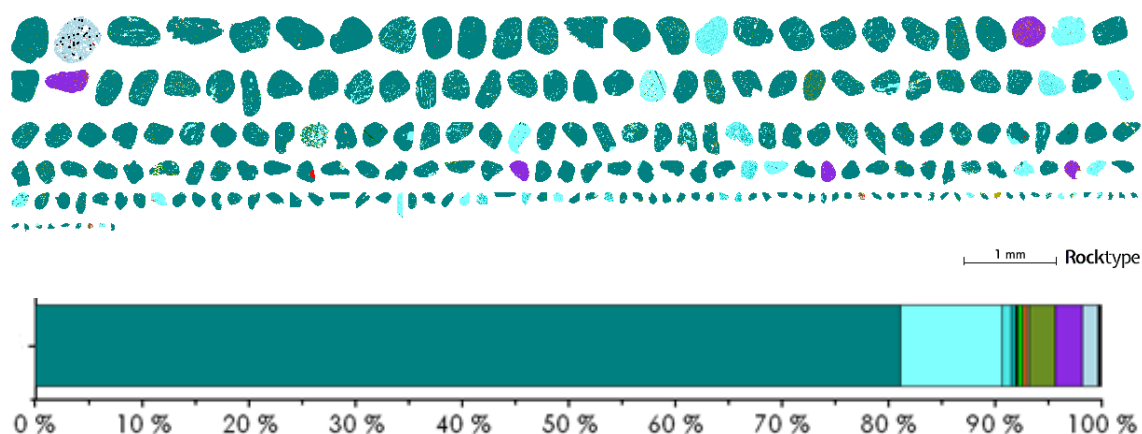


Figura 24 - Imagem e mineralogia modal *QEMSCAN* (sem quartzo) mostrando grãos individuais contaminantes. Verificam-se essencialmente feldspatos potássicos (verde), plagioclases (azul claro) e turmalina (roxo). Um grão de cianite mostra inclusões de vários óxidos e alguns materiais *não classificados*.

3. Mistas: Aqui, considera-se o quartzo com inclusões argilosas, por vezes com outros minerais como o rútilo e óxidos de ferro, que ocorrem ocasionalmente incluídos nos grãos, mas também agregados à sua superfície (ver [Figura 25 c](#))).

Ainda neste conjunto, os feldspatos mistos potássico-sodo-cálcicos (pertites) ocorrem comumente. A presença de argilas de alteração dos feldspatos, essencialmente cauliníticas, também é frequente.

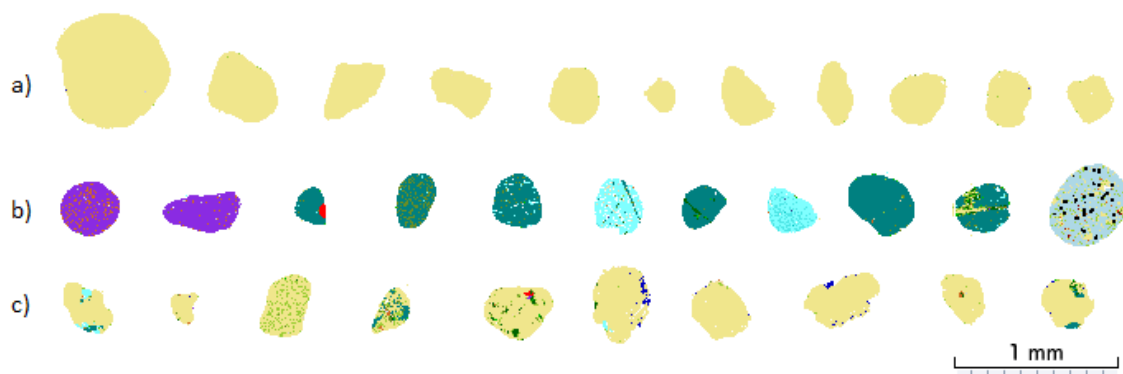


Figura 25 - Tipos de partículas relevantes na amostra analisada. a) Quartzo essencialmente puro; b) Contaminantes individualizados (leves e pesados); c) Partículas mistas de quartzo com inclusões e/ou coberturas por outros minerais contaminantes.

É essencialmente neste tipo de partículas mistas que se concentra o problema do processamento mineral, visto que o aproveitamento ou remoção deste tipo de material torna-se extremamente oneroso visto que os minerais de quartzo contêm pequenas inclusões de difícil separação. Aquelas contribuem com óxidos prejudiciais, principalmente de ferro e titânio.

5.4 Análise química

A composição química completa das amostras estudadas esta apresentada na Tabela 25 e revela algumas diferenças que podem estar relacionadas com o local e a profundidade a que foram retiradas.

Verifica-se que a percentagem de sílica total é superior na amostra 3, cerca de 97%, ao passo que as amostras 1 e 2 apenas apresentam cerca 95% desse óxido. No entanto, uma pá escavadora, utilizada habitualmente neste tipo de explorações, inclui remoção de material de cima para baixo em todas as profundidades, o que implica que o teor em SiO_2 da areia a seguir para uma central de tratamento, naquela zona deverá ser de aproximadamente 96%, média das três amostras prospetadas no céu aberto.

A presença de Al_2O_3 (<1,5%), K_2O (<2,5%) estão relacionados essencialmente com a presença de feldspatos potássicos e algumas micas, assim como o P_2O_5 com a ocorrência de

apatite. O sódio, encontrado na areia sob a forma de óxido de sódio (Na_2O) não é detetado pelo XRF utilizado, porém este deve ocorrer nas amostras em quantidades inferiores a 0,1%.

Tabela 25 - Composição química total das amostras *tal-qual* (elementos maiores, menores e traço).

Óxidos Principais	Amostra			
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	média
SiO ₂	95,614	95,345	97,052	96,004
Al ₂ O ₃	0,810	1,489	0,889	1,063
Fe ₂ O ₃	0,129	0,248	0,051	0,143
MnO	0,009	<LOD	0,007	0,008
CaO	0,07	0,05	0,034	0,051
MgO	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Na ₂ O	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
K ₂ O	2,32	2,298	1,531	2,05
TiO ₂	0,031	0,06	0,016	0,036
P ₂ O ₅	0,364	0,407	0,255	0,342
SO ₃	0,388	0,041	0,029	0,152
Cl	0,152	<LOD	<LOD	0,152
Cr ₂ O ₃	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
BaO	0,051	0,031	0,046	0,043
Rb ₂ O	0,008	0,007	0,006	0,007
ZrO ₂	0,005	0,006	0,004	0,005
TeO ₃	0,023	0,015	0,02	0,019
Outros	0,026	0,004	0,061	0,030

O Cr_2O_3 também não é detetado em nenhuma das amostras iniciais estudadas no XRF devido ao limite de detecção elevado do espectrómetro utilizado, para este elemento. Porém na análise mineralógica quantitativa anteriormente abordada foram são verificados minerais associados ao Cr. No entanto este óxido poderá ocorrer associado ao grupo de minerais da espinela sob a forma de cromite, associado com óxidos de ferro e magnésio e que podem estar dispersos no quartzo ou na muito fração fina pesada; porém, o Cr deve ser muito pouco frequente e deve ser classificado como elemento traço a ultra-traço nestas areias.

Para além dos óxidos principais detetados, foram encontrados alguns elementos traço a ultra-traço (0,1 - 0.0001%), como o BaO e SrO associados aos feldspatos e ainda o Rb₂O às micas e feldspatos.

A presença dos óxidos Fe₂O₃, TiO₂, ZrO₂ em todas as amostras é prejudicial ao fabrico de vidros pelo que terá de ser limitada consoante o setor da indústria vidreira e tipo de vidro a fabricar.

5.5 Análise do processamento

Após um tratamento à amostra 1 de peneiração lavagem e separação magnética, a areia mostrou melhorias em todos os componentes previstos. A composição química relativa em óxidos da amostra processada, está apresentada comparativamente à amostra inicial (*tal-qual*) na Tabela 26. Neste processamento apenas foi englobada a fração granulométrica mais utilizada pelas indústrias - intervalo]0,85; 0,125] mm.

Tabela 26 - Composição química da amostra 1 Inicial (I) e depois de processada (P) - lavagem e separação magnética usuais em areias.

Amostra	Inicial (I)	Processada (P)	Diferencial (P-I)
Óxidos	% relativa	% relativa	% relativa
SiO ₂	95.668	97.189	1.521
Al ₂ O ₃	0.81	0.637	-0.173
Fe ₂ O ₃	0.129	0.059	-0.07
CaO	0.07	0.14	0.07
K ₂ O	2.321	1.291	-1.03
TiO ₂	0.031	0.016	-0.015
P ₂ O ₅	0.364	0.405	0.041
SO ₃	0.388	0.119	-0.269
Cl	0.152	0.12	-0.032
Cr ₂ O ₃	N.D.	0.008	-
BaO	0.051	0.01	-0.041
Rb ₂ O	0.007	0.002	-0.005
ZrO ₂	0.005	0.003	-0.002
SrO	0.003	0.001	-0.002
Total	100	100	0.000 +/- 0.008

Verifica-se que a qualidade da areia melhora significativamente em relação ao aumento de sílica de 1,5%, em peso em relação à amostra de areia inicial. O mais interessante é verificar-se uma benéfica diminuição de óxidos prejudiciais à valorização económica do recurso de areias na indústria vidreira, como o Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂ e alguns voláteis, entre outros, sendo que não se obteve resultados pormenorizados em relação ao Cr₂O₃.

Estes resultados foram obtidos com uma lavagem durante 5 minutos com alguma fricção suave entre os grãos; porém estes valores devem melhorar após uma passagem pela central de processamento, em cujo circuito as areias são normalmente lavadas durante uma ou mais horas. De facto, a otimização de uma central de processamento de modo a que tenha a capacidade de induzir um maior atrito e fricção entre as partículas durante um período de tempo prolongado com sucessiva remoção de material fino e matéria orgânica será sempre benéfica na qualidade final das areias. Um separador magnético, no final do circuito e até a conjugação de outros métodos de separação baseados nas propriedades físicas dos materiais tenderá a aumentar a %SiO₂ relativamente a outros compostos prejudiciais.

5.6 Aplicações industriais das areias

5.6.1 Indústria do vidro

O processamento anterior (ponto 5.5) permitiu determinar as aplicações industriais finais, do ponto de vista químico, a que podem ser destinados tais recursos de areias. Assim do cruzamento dos resultados da Tabela 26 (coluna "Processada"); com a Tabela 13 (BS, 1998) surge, em termos químicos, a aplicabilidade das areias em estudo nos vários produtos de vidro padronizados (*British Standard*) que é mostrada na Tabela 27.

Tabela 27 - Aplicabilidade das areias de estudo em produtos de vidro.

Óxidos (%)		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Amostra estudo (D-F)	Aplicabilidade:	97.2	0.64	0.0591	0.007997
Classe da areia	Produtos de vidro				
A	Vidro ótico e oftálmico	> 99.7	< 0.2	< 0.013	< 0.00015
B	Tableware	99.6 ± 0.1	0.2 ± 0.1	≤ 0.010	< 0.0002
C	Vidros borossilicatado	99.6 ± 0.1	0.2 ± 0.1	≤ 0.010	0.0002
D	Recipientes de vidro incolor	98.8 ± 0.2	Nominal ± 0.1	≤ 0.03 ± 0.003	0.0005
E	Vidro plano transparente	99.0 ± 0.2	0.5 ± 0.15	0.10 ± 0.005	-
F	Recipientes de vidro colorido	97.0 ± 0.3	Nominal ± 0.1	0.25 ± 0.03	-
G	Vidro para fibras isolantes	94.5 ± 0.5	3.0 ± 0.5	0.30 ± 0.05	-

Legenda: Areia por tipo de vidro -

	Difícilmente aplicável sem tratamentos muito onerosos
	Eventualmente aplicáveis com melhoria significativa na otimização do processamento
	Possivelmente aplicável com lavagem e classificação prolongada e separação magnética
	Aplicável com separador magnético
	Aplicação direta apenas com lavagem e classificação
	Nominal - dependente do fabricante

De facto, nas amostras analisadas, as areias mostram aplicabilidade direta, depois de lavagem e classificação, para as fibras de vidro. Mesmo com uma intensa lavagem e classificação numa central de processamento a aplicação em vidros de recipientes coloridos deverá ser possível.

Em conjugação com a central eficiente, a separação magnética permite aplicação em vidro plano transparente e em recipientes incolores. Estes últimos deverão exigir, por exemplo, um prolongamento dos tempos de passagem do material no circuito.

As aplicações mais difíceis prendem-se com as da utilização contínua destas areias siliciosas nos produtos de vidro especiais, como o borossilicatado; e no vidro tipo *Tableware* cujas normas se mostram bastantes exigentes. Podem no entanto surgir zonas de material com elevada pureza que permitam uma beneficiação, com recurso a estes métodos, até valores superiores a 99,5 % SiO_2 .

5.6.2 Outras indústrias

Para as indústrias dos moldes de areias e da fraturação hidráulica a beneficiação do minério em termos de Quartzo deverá seguir a metodologia da indústria vidreira. Valores em SiO_2 semelhantes aos requeridos para o vidro incolor de recipiente devem ser suficientes para o aproveitamento destas areias como moldes em vários metais e como material propante granular, na fraturação hidráulica.

As baixas percentagens em minerais solúveis e os valores insignificantes valores em CaO e MgO e Fe_2O_3 até diminuídos com o processamentos não deverão oferecer problemas relativamente à dissolução de material do molde ou dentro de furos. No entanto o Al_2O_3 deve ser reduzido, nos moldes de areia, para valores menores ou iguais a 0,4%.

Para estas duas indústrias alguns ensaios poderão ser necessários como a expansibilidade térmica e resistência ao esmagamento da areia, entre outros, que permitam obter mais resultados.

A morfologia foi avaliada pela análise dos 100 grãos que se encontram selecionados no **Anexo 2 e 3**, resultando uma classe de rolamento média de sub-angular a sub-rolada estimada com o valor médio de 0.3441. Esta classificação dos grãos em termos morfológicos pode ser vista graficamente no histograma das frequências absolutas na Figura 26.

Na fraturação hidráulica, porém, as areias deverão passar por um processo de arredondamento das suas arestas para que a sua classe de rolamento e esfericidade passem ambos a ter valores médios iguais ou superiores a 0,6.

Para a fundição, a classe de rolamento indica uma boa aplicabilidade, facto que se junta ao índice de finura analisado, como atributos chave na utilização para estas indústrias.

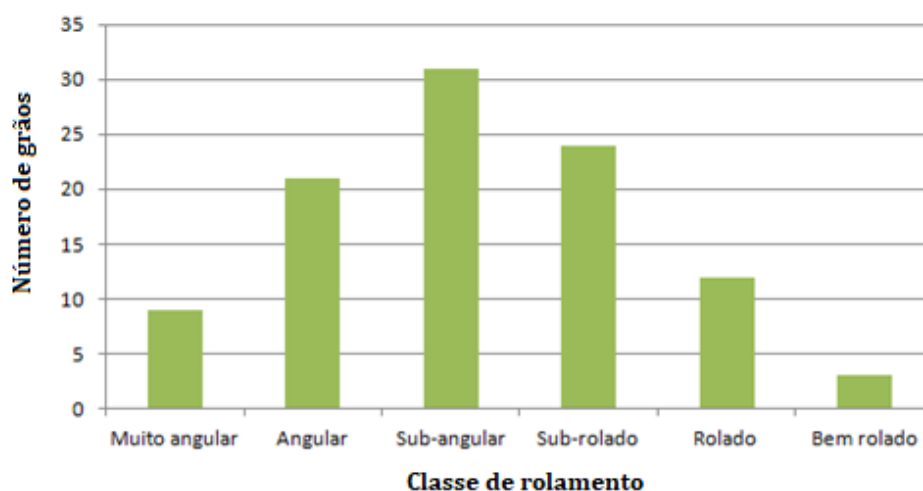


Figura 26 - Histograma das frequências absolutas por tipo de grão com base na sua classe de rolamento.

5.7 Avaliação de recursos

5.7.1 Prospecção sísmica de refração

Foram realizados 11 perfis sísmicos ao longo do terreno, como se pode ver na Figura 27, cada um dos quais com dois tiros, direto e inverso, respetivamente. Daqui resultam, para cada tiro duas profundidades correspondentes às distâncias a que se encontram as superfícies de refração medidas a partir da superfície e calculadas pelas expressões apresentadas nas equações: (6) e (7) (subcapítulo 0). Os perfis de 65 metros de extensão têm uma equidistância entre geofones de 5 metros, à exceção dos perfis p5, p8 e p11; de extensões diferente e uma equidistância de, respetivamente, 7, 6 e 4 metros.

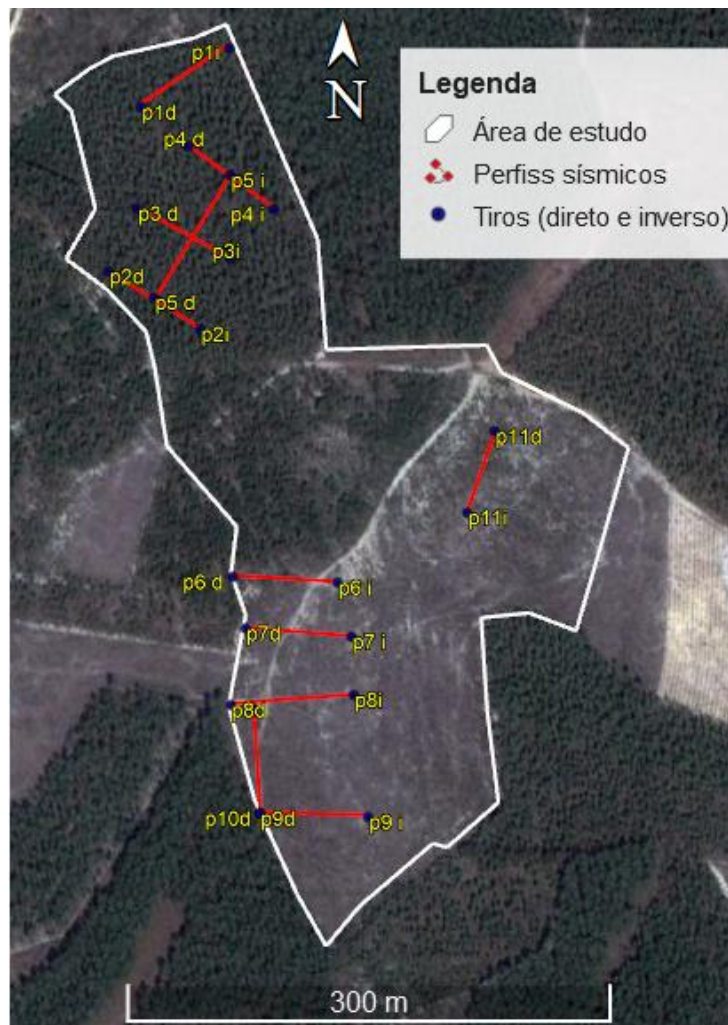


Figura 27 - Localização dos perfis sísmicos de refração (linhas a vermelho) realizados na área de estudo (linha branca) sobre o ortofotomapa.

Os perfis p5 e p10 tiveram como objetivo cruzar outros perfis de modo a minorar eventuais erros nas profundidades calculadas por meio das dromocrónicas, enquanto que o perfil p11, realizado sobre a superfície inferior da área em exploração, teve como objetivo de verificar a evolução das velocidades e para confirmar a ausência deste tipo de recuso explorável abaixo dessa profundidade, o que originou a deteção de mais 2 meios de propagação diferentes. A ausência de mais perfis sísmicos deve-se essencialmente à densidade da vegetação, que torna muitos locais inacessíveis para instalar devidamente os alinhamentos de geofones.

Os contrastes de velocidade verificados através da análise da inclinação das dromocrónicas, como é exemplo a Figura 28, permitiram inferir mudanças de meio de propagação das ondas e consequente mudança de litologia. A partir das expressões h1 e h2 calcularam-se as espessuras do recurso de areia ao longo dos 10 perfis sísmicos, por diferença entre as profundidades h2 e h1; bem como a espessura da camada de solo, correspondente diretamente à profundidade h1 (exemplo na Tabela 28).

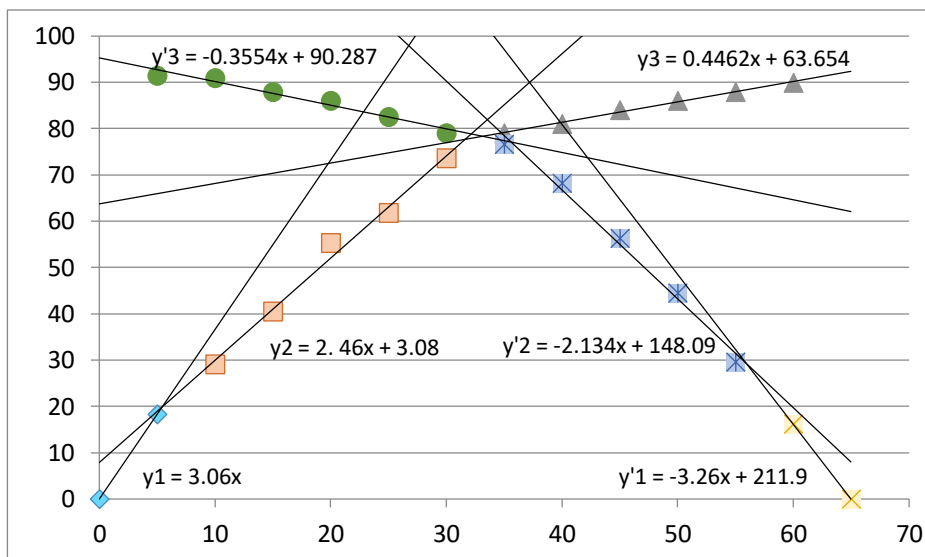


Figura 28 - Exemplo do traçado das dromocrônicas correspondente a um perfil sísmico e as equações das respectivas semi-retas. Tiro direto traçado à esquerda, a partir do ponto (0,0) e inverso à direita, a partir do ponto (65,0).

Tabela 28 - Sequência de cálculos para as profundidades h1 e h2 e espessura do recurso explorável com base nas dromocrônicas da Figura 28.

Tiro Direto				
Equação das dromocrónica	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura de recuso(m)
y = 3.06x	326.797	5.13	0.84	12.39
y = 2.46x + 3.08	406.504			
y = 0.4462x + 63.654	2241.147	30.1	13.23	
Tiro Inverso				
Equação das dromocrónica	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
y = -3.26x + 211.9	306.748	8.33	1.9	13.42
y = -2.134x + 148.09	468.603			
y = -0.3554x + 90.287	2813.731	32.5	15.32	

Na Tabela 29 apresentam-se as velocidades médias detetadas que permitiram avaliar as litologias prospectada com base nos 10 perfis realizados sobre terrenos ainda não explorados.

Nota: Todos os sismogramas e cálculos relativos à sua interpretação que deram origem aos resultados da sísmica de refração, principalmente no que diz respeito às velocidades medidas e profundidades h1 e h2, encontram-se em anexo (**Anexo 4 e Anexo 5**).

Verificou-se a existência de três diferentes meios, detetados pela refração dos sinais emitidos em duas superfícies de refração, com diferentes velocidades de propagação. Estes três meios surgem ao longo de todos os perfis referidos, com as velocidades em cada perfil a corresponderem a velocidades típicas de materiais tabeladas por várias entidades, entre as quais a ASTM.

Tabela 29 - Velocidades médias e classificação das litologias detetadas a partir superfície.

Meio	Velocidade média	Classificação
1	287	Solo arenoso perturbado
2	450	Areia siliciosa "limpa"
3	1885	Areia argilosa

A diferença entre as profundidades h_2 e h_1 , calculadas a partir das respetivas equações, indicam uma espessura média do recurso de areias, nos locais prospetados de aproximadamente, 11,81 metros como se mostra na Tabela 30:

Tabela 30 - Espessuras de recurso detetadas na prospeção sísmica de refração, por perfil.

Perfil	Espessura média em cada perfil	Perfil	Espessura média em cada perfil	Espessura média total
1	12,68	6	10,57	11,81
2	12,51	7	11,64	
3	12,08	8	11,00	
4	12,91	9	10,58	
5	13,64	10	10,48	

Os resultados permitem ainda dividir e analisar a zona de estudo segundo duas áreas distintas A1 e A2, nas quais se detetaram espessuras médias de recurso ligeiramente diferentes. Para tal, estudaram-se cortes na direção Este - Oeste, representados a azul escuro na Figura 29, e que na área 2 correspondem aos perfis sísmicos que apresentam essa mesma direção aproximada; e um corte Norte – Sul, abrangendo ambas as áreas, a fim de verificar se existe algum tipo de evolução nas espessuras das areias siliciosas bem como do solo de cobertura.

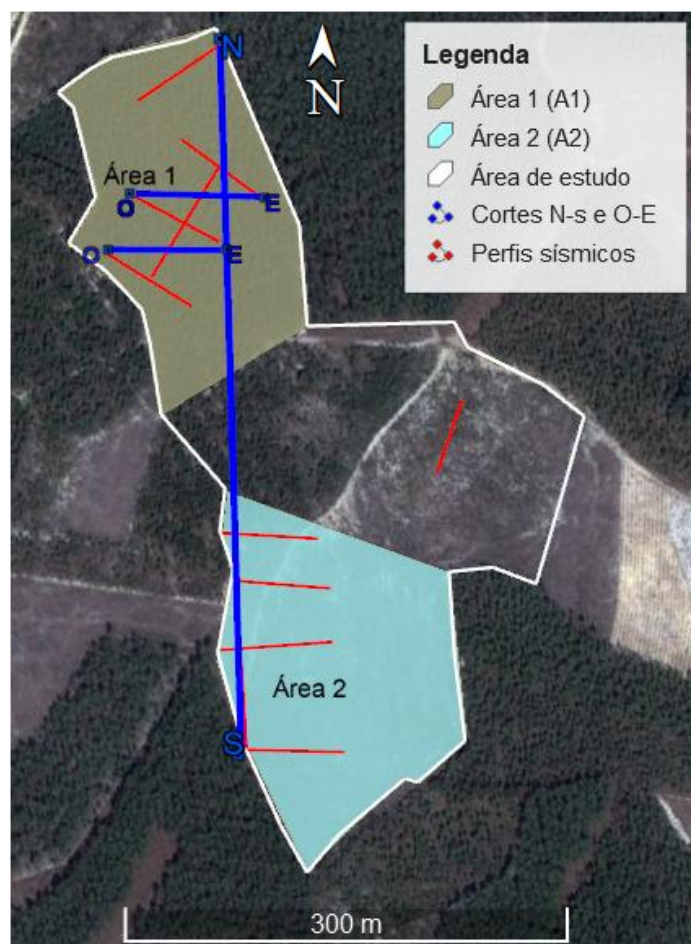


Figura 29 - Áreas delimitadas para o estudo das espessuras, corte N-S; e cortes E-O (azul escuro).

O **corte Norte - Sul (N-S)** de aproximadamente 470 metros de comprimento, que passa junto dos tiros p1i, p5i, p3i, p6d, p7d, p10d mostrou que:

- A espessura dos solos de cobertura aumenta em geral para sul, sendo que na área A2 os mesmos são mais espessos, em média, em comparação com os da área A1;
- A espessura de areia siliciosa detetada na área A1 é quase sempre superior à verificada na área A2, sendo que em média, existem mais 1,5 metros de areias exploráveis na área localizada mais a Norte (A1) em relação à A2.

Os dois **cortes Este - Oeste (E-O)** têm uma extensão significativamente menor (< 90 metros), estando representados em A1 pela união dos tiros p4i com p3d e de p3i com p2d, respetivamente. Na área A2 correspondem aos perfis sísmicos originais com aproximadamente essa direção. Em média verificou-se:

Na Área 1:

A espessura dos solos de cobertura é variável diminuindo ligeiramente para Oeste em ambos os cortes;

A espessura de areia siliciosa é variável na direção E - O, porém demonstrando um aumento de alguns decímetros para Oeste.

Na Área 2:

A espessura dos solos de cobertura é geralmente superior em relação a A1, mas muito variável na direção E - O;

A espessura de areia siliciosa também diminui para oeste, poucos decímetros.

No entanto, a esta escala não é possível verificar-se nenhum tipo de tendência predominante nas variações das espessuras das camadas, sendo que estas variam sempre alguns decímetros, por vezes de forma desordenada em termos direcionais. O que geralmente se verifica é que as espessuras de areias siliciosas tendem a aumentar com a diminuição da camada de solos de cobertura.

Interpretação do Perfil sísmico 11

A Figura 30 ilustra um corte geológico baseado no perfil sísmico p11, local em cujo o tiro direto foi feito ainda sobre uma camada de areia siliciosa, com cerca de 1,9 metros de espessura e o tiro inverso efetuado sobre a camada abaixo (areias argilosas compactadas). Por este motivo, resultaram para aquele meio velocidades mais baixas do que o esperado, dado que nesta zona o material ocorre mais descomprimido devido à escavação e, eventualmente, perturbado pela movimentação de máquinas e pessoas (ver Tabela 31).

Tabela 31 - Dromocrónicas e cálculo de espessura da camada de areias argilosas subjacente ao recurso (laranja) - areias argilosas.

Perfil 11					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3x	333,33	4,85	1,9	6,7
2	y = 0,65x + 11,4	1538,46			
3	y = 0,3071x + 19,39	3256,27	23,30	8,6	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 1,25x	800,00	17,13	6,4	6,4
2	y = 0,2857x + 12,238	3500,18			
3	y = 0,1827x + 16,087	5473,45	37,37	14,1	

As velocidades e classificação dos meios prospectados está apresentada na Tabela 32.

Tabela 32 - Velocidades médias e classificação de todas as litologias detetadas.

Meio	Velocidade média	Classificação
1	287	Solo arenoso perturbado
2	450	Areia siliciosa "limpa"
3	1885	Areia argilosa
4	3378	Arenito/Margas (?)
5	5473	Margas (?)

Este perfil sísmico permitiu, estimar a espessura da camada subjacente ao recurso entre 6,4 e 6,7 metros e inferir que a camada imediatamente abaixo daquela tem cerca de 7,7 metros, sendo ainda detetada outra interface que, eventualmente poderá representar ocorrência de margas hetangianas (de cor *bordeaux*, na Figura 30) apresentadas na carta geológica.

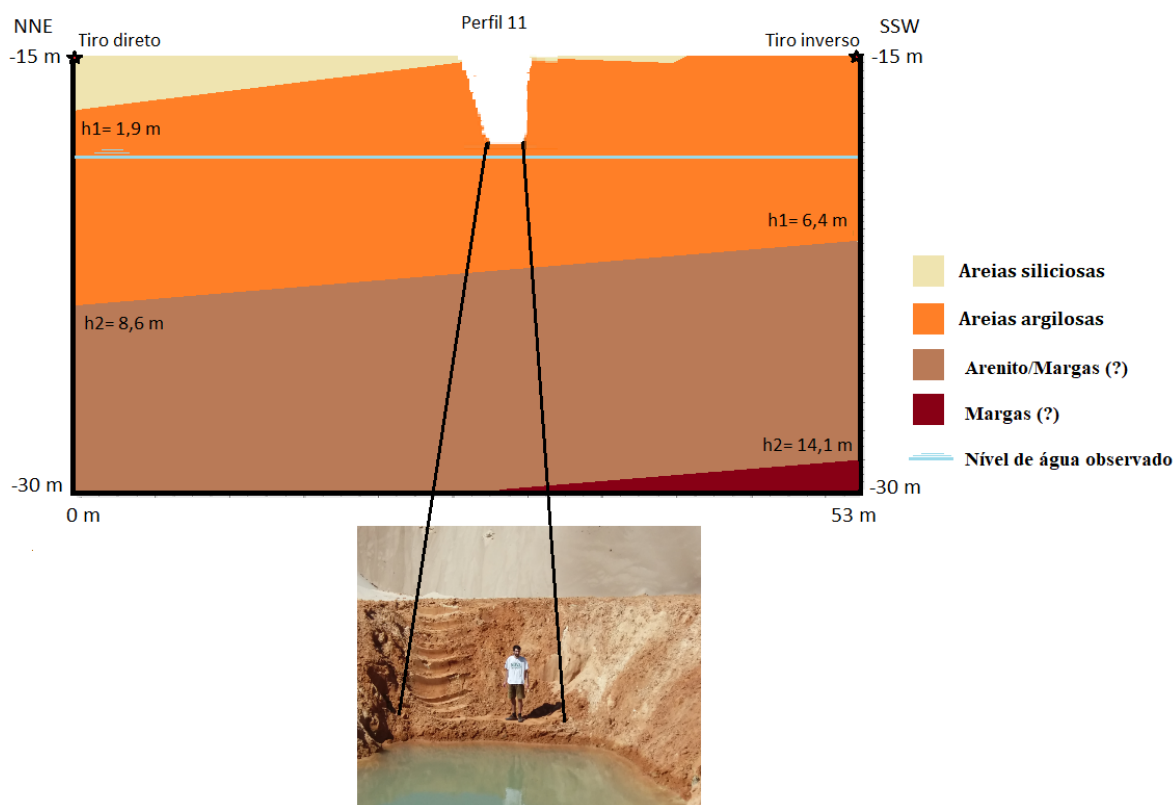


Figura 30 - Corte correspondente ao perfil 11, baseado na interpretação da refração sísmica na base da exploração.

O Modelo conceptual dos terrenos subsuperficiais, baseado nos resultados da prospeção geofísica realizada para toda a área de estudo, na interpretação do perfil 11 e na informação geológica da área de estudo, está sintetizado na Figura 31.

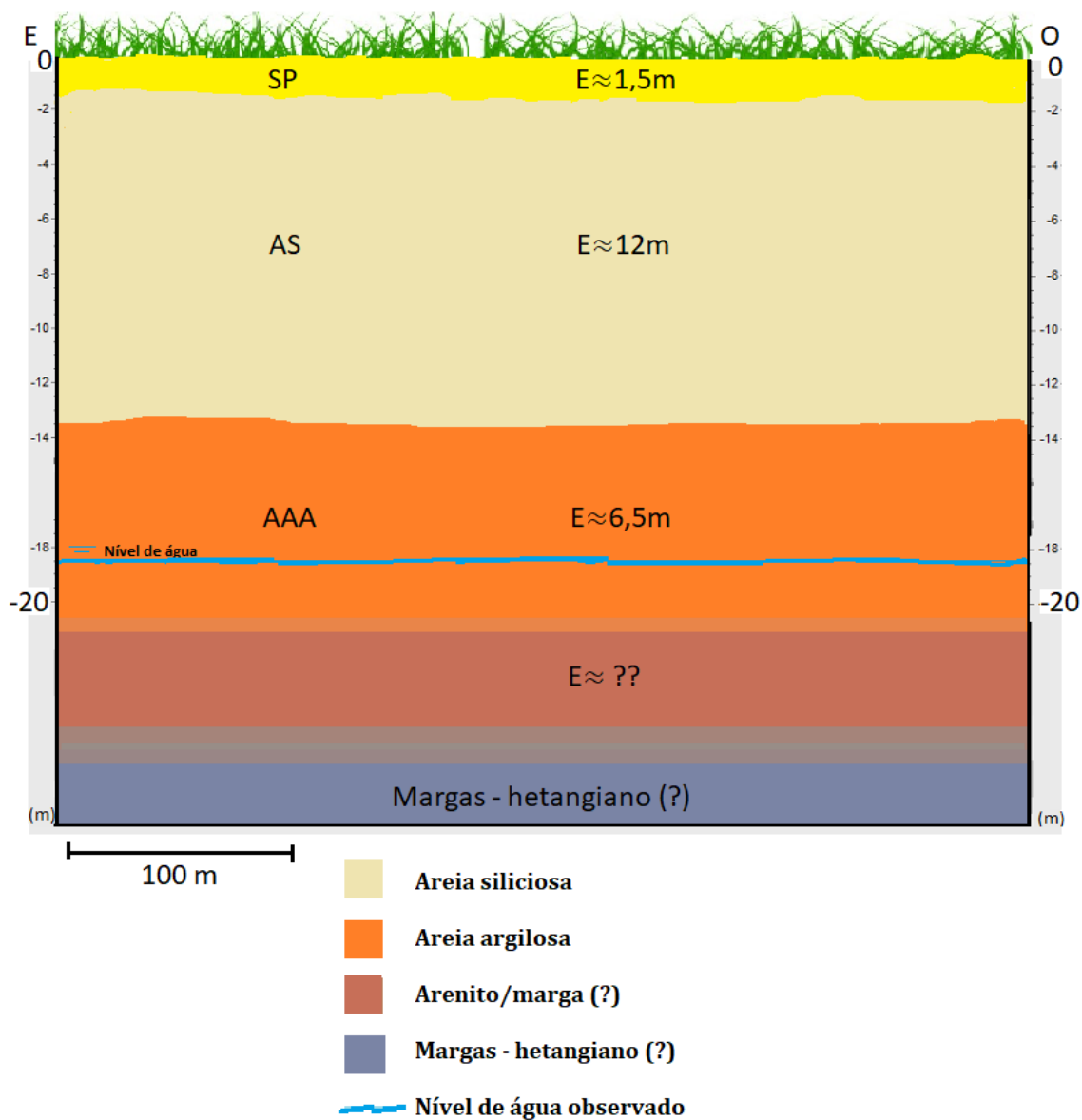


Figura 31 - Modelo conceptual da área de estudo. SP - solo perturbado; AS - Areias siliciosas; AAA - Areias argilosas alaranjadas; E - Espessura detetada.

Com base nas profundidades detetadas, h_1 e h_2 , juntamente com as coordenadas dos tiros direto e inverso dos dez perfis sísmicos realizados na superfície original do terreno apresentados na Tabela 33 e no modelo conceptual traçado, foi possível construir um modelo geológico simplificado da área de estudo.

Tabela 33 - Coordenadas dos tiros direto(d) e inverso(i) e resultante dos cálculos de das interfaces para cada perfil sísmico.

Perfil	Tiro	Comprimento	meridiano	perpendicular	h1(m)	h2(m)
1	d	65	-71704.2	-3511.57	1.7	14.15
	i		-71649.5	-3477.22	0.88	13.78
2	d	65	-71725.7	-3611.3	0.41	14.36
	i		-71669.7	-3647.3	1.26	12.33
3	d	65	-71707.7	-3572.92	1.36	14.03
	i		-71650.5	-3604.29	1.78	13.27
4	d	65	-71675.6	-3535.58	0.84	13.23
	i		-71623.5	-3574.62	1.9	15.32
5	d	87	-71697.9	-3627.6	1.85	16.72
	i		-71650	-3553.71	2.7	15.1
6	d	65	-71651.1	-3799.84	1.47	11.1
	i		-71586.3	-3803.83	1.4	12.9
7	d	65	-71643.5	-3831.37	2.3	13.37
	i		-71578.2	-3837.22	2.25	14.45
8	d	76	-71653	-3878.47	1.95	12.6
	i		-71577.2	-3878.25	2.07	13.42
9	d	65	-71635.8	-3945.57	2.6	13.61
	i		-71568.8	-3948.66	1.47	11.61
10	d	65	-71635.8	-3945.57	2.6	13.61
	i		-71639	-3881.38	0.72	10.67

5.7.2 Estimação de recursos - Modelação geológica

A Figura 32 e a Figura 33 mostram o resultado da modelação das superfícies de refração identificadas como zonas de transição de litologia e a estimação de volumes de solo superficial e de recurso de areias, respetivamente. A superfície 1 corresponde ao início do recurso e a superfície 2 à base do mesmo (Figura 32). O volume calculado entre essas duas superfícies corresponde ao volume de recurso disponível para exploração (Figura 33).

É de verificar que o depósito mineral apresenta uma forma tabular, com relativa homogeneidade em termos de espessuras da camada de cobertura (solo) e da camada de interesse económico, exibindo esta última uma espessura média de aproximadamente 12 metros, variando nos extremos entre 9,63 e os 14,87 metros. A camada deve-se prolongar para Oeste pela região cartografada no Plio-Plistocénico, com espessura variável, na ordem dos poucos metros, tendo em conta os dados sísmicos obtidos, a geologia regional e a forma do depósito observada.

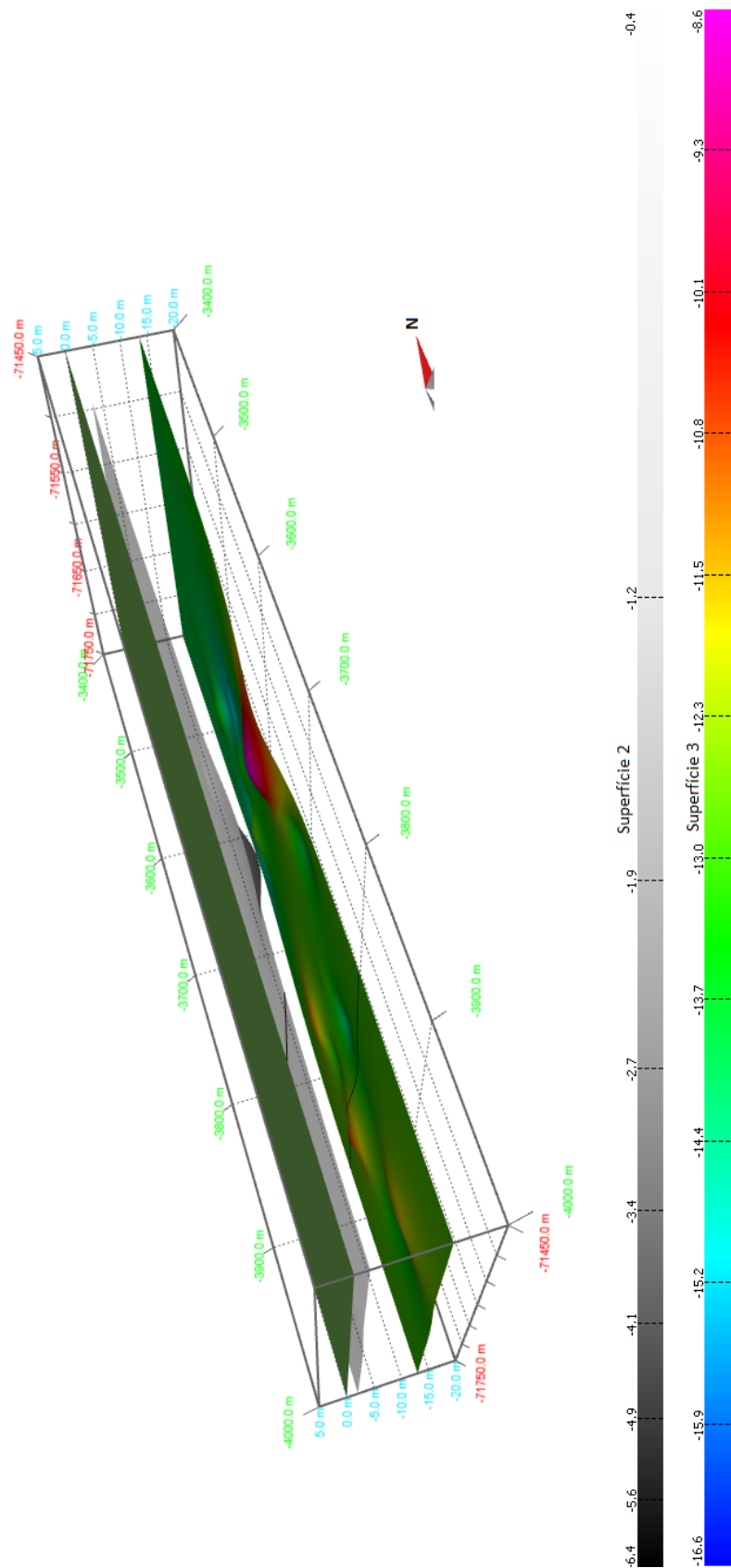


Figura 32 - Modelação das superfícies pelo IQD.

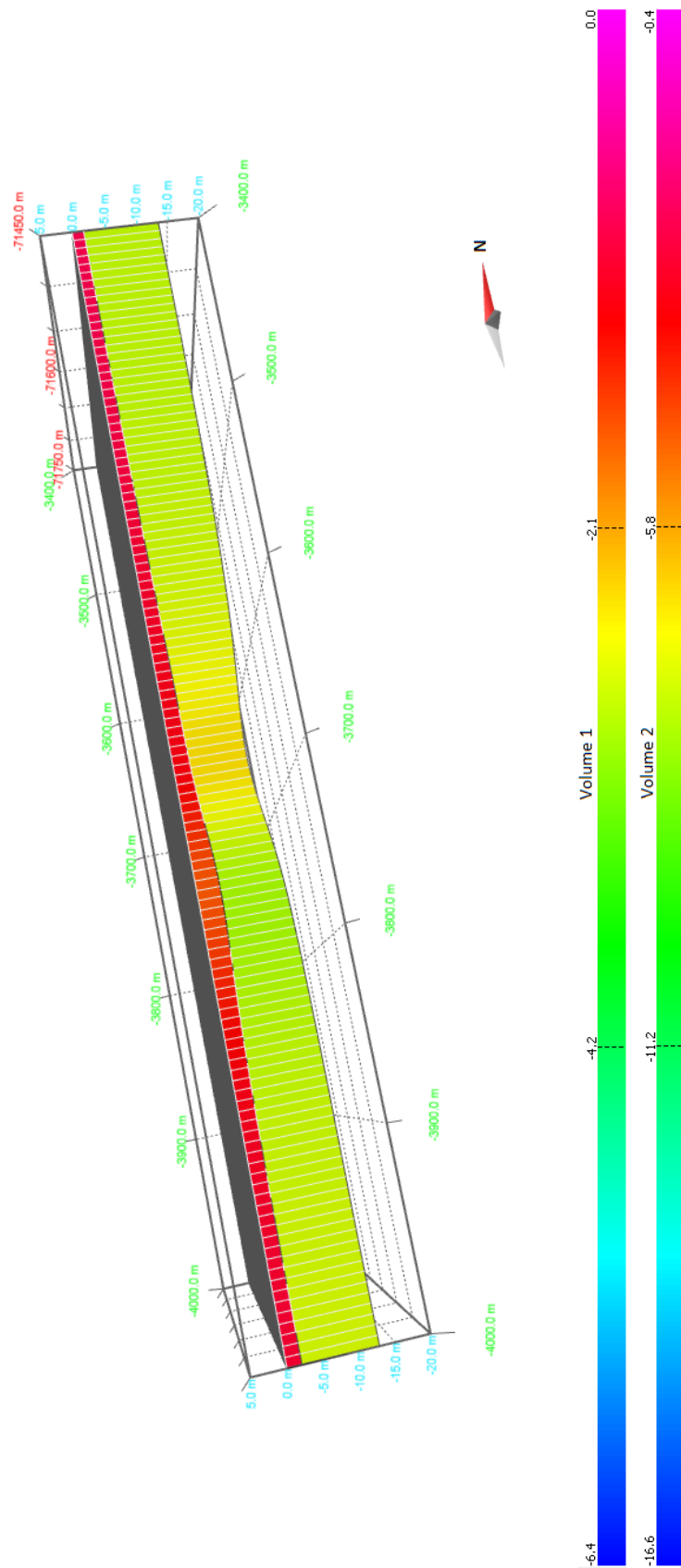


Figura 33 - Modelação dos volumes para o cálculo de recursos.

Os volumes inferidos para a área retangular de 300 x 550 m mostrada ao redor do polígono de estudo, inclusive, são estimados em:

Volume 1 - Solos a remover - SP (vermelho): **349 000 m³**;

Volume 2- Areia siliciosa a explorar - AS (Amarelo a verde): 2 M m³.

Já os volumes calculados para o polígono da área de estudo, são de:

Volume 1 - Solos a remover - SP (vermelho): **170 207 m³**

Volume 2- Areia siliciosa a explorar - AS (Amarelo a verde): **963 439 m³**

Tendo em conta todos os resultados obtidos neste trabalho, é possível a comparação deste depósito de areias siliciosas com outros já estudados e, explorados ou em exploração. A Tabela 34 mostra a avaliação do recurso de areias siliciosas.

Tabela 34 - Avaliação do depósito de areias (recurso) - "Areiro Camarão 4".

Avaliação do recurso	% Sílica	Granulometria dominante (mm)	Condicionantes Química/mineralógica	Continuidade no espaço	Potencial Geoeconómico e recursos
Qualitativa	-	Sub-angular a sub-rolados	No Quartzo: inclusões de argilas e associação de TiO ₂ ; e Fe ₂ O ₃ .	Por avaliar	Elevado: Várias aplicações industriais
Quantitativa	>95% em SiO ₂	0,425 mm<94,5%> 0,106 mm	Feldspatos (6.8 %); cianite (0,11%) Turmalina, Rútulo e argilas (0,54%)	Espessura média ≈11)	Grande: Volume >2Mm ³
Metodologia utilizada	XRF	ASTM e AFS	XRF e <i>QEMSCAN</i> (microscopia eletrónica)	Sísmica de refração; Sem amostragem	IQD. Sem modelação de teores

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Considerações sobre as areias da área em estudo

- A zona de estudo é especialmente apelativa à indústria portuguesa, com destaque para o a indústria vidreira, em vidros de embalagem, mas possui também características granulométricas e químicas/mineralógicas que podem ser levadas em consideração para outros setores como os vidros planos.
- O areeiro está inserido numa região geológica e quimicamente favorável à sua utilização como centro produtor de areia siliciosa, tendo em conta a espessura e qualidade das areias ocorrentes, que chegam a ter cerca de 96% do composto SiO_2 *in situ*. As granulometrias predominantes entre os 0,106 e 0,850 mm e a morfologia sub-angular a sub-rolada das partículas de quartzo permitem uma fácil adaptação à maioria das indústrias consumidoras.
- A aplicação noutras indústrias como a da fundição e na fraturação hidráulica depende, para além da beneficiação em SiO_2 , da definição de um mercado que permita a exploração de quartzo granular em grande escala e que seja viável aos investimentos em tecnologias de beneficiação mais onerosas. Os custos de transporte, ponderados em relação ao custo da areia siliciosa, geralmente não compensam exportação em escala. Por tal razão, é necessário um aumento da procura nas indústrias transformadoras e da construção, nomeadamente na produção de, respetivamente peças metálicas, vidros de vários tipos e produção de materiais que utilizem agregados.
- Será, no entanto, difícil o processamento rentável até teores de SiO_2 suficientemente elevados que permitam a utilização destas areias nas indústrias de maior valor acrescentado e de alta tecnologia, tais como vidro óticos, painéis solares e outros produtos que exijam valores acima de 99,5% em SiO_2 devido, essencialmente, à presença de partículas mistas.
- Os recursos calculados para a área concessionada (estudada) são pouco superiores a 960.000 m³.
- As areias siliciosas na área de estudo têm grande extensão, sendo possível inferir que existam cerca de 7 M.m³ de reservas de areias siliciosas nos 63 ha de área total pretendidos para futura concessão.

6.2 Perspectivas futuras de trabalhos relacionados com este depósito

- A análise da relação entre os depósitos detríticos do Quaternário com o clima e tectónica regional nesse espaço temporal pode em conjunto com uma correlação com os depósitos estudados (Plio-Plistocénicos) detetar novos locais viáveis de exploração.
- Para este depósito, sondagens ou escavações pontuais espalhadas pela região podem permitir prever a variação espacial do recurso em espessura e composição química, incluindo possíveis níveis de areias siliciosas em profundidades abaixo das registadas neste estudo. As análises químicas e mineralógicas dos compostos presentes, mais especificamente dos minerais pesados e inclusões no quartzo, podem fornecer indicações sobre as composições dos fluídos e condições de génese das rochas pré-existentes bem como recriar os processos que estão na origem deste material.
- Com as crescentes exigências, a análise da fração fina destas areias pode revelar-se interessante num futuro reaproveitamento do material argiloso rejeitado, tal como a caulinite.
- A subida do nível de água em determinados períodos ou a exploração em zonas muito profundas noutra região adjacente ou caso hajam recursos abaixo exploráveis levará, após alguns metros, à utilização adicional de bombagem de água ou à utilização de dragas para exploração abaixo do nível de água.
- Os futuros estéreis resultantes da beneficiação da areia podem classificar-se como “Areias e argilas” de acordo com o código LER 01 04 09 publicada na portaria n.º 209/2004, de 3 de Março do diário da república) e ser acomodados em tanques de lamas e se reutilizadas caso exista hipótese de aproveitamento de um subproduto desse material ou utilizadas como material de enchimento na recuperação final das zonas exploradas do areeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Foundry Society. (2018). Introduction to Foundry Sand. Disponível em: <https://www.afsinc.org/introduction-foundry-sand>
- Akerman, M. (2000). Natureza, estrutura e propriedades do vidro. *Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil*, 35, 8-23.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). Ficha do *Sistema aquífero : Caldas da Rainha – Nazaré (O33)*. Lisboa, 421-431.
- Alonso, L. M. (2014). Optimization of flotation for the reduction of heavy minerals and iron content on Silica Sand. Tese de Mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Lisboa. 54 p.
- André, J. N., Cunha, P. P., Dinis, J., Dinis, P., & Cordeiro, F. (2009). Características geomorfológicas e interpretação da evolução do campo dunar eólico na zona costeira entre a Figueira da Foz e a Nazaré. *Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, VI. Braga, 39–44.
- Associação Portuguesa da Fundição, Instituto português da qualidade, Universidade do Porto, (2014). *Manual da Segurança e Saúde no Trabalho* (Indústria da fundição). Disponível em: http://www.apf.com.pt/docs/MANSST_Fundicao.pdf.
- ASTM D5777-00 (2000). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*. West Conshohocken, PA, 2000. www.astm.org.
- Aydin, E. (Glass Research Centre, S. S. (2000). Glass Raw Materials: Cost and Quality Aspects. Em: *Proceedings of the First Balkan Conference on Glass Science & Technology*. Volos-Greece, 9-10 de Outubro, University of Thessaly, 278–282.
- Frohlich, F. (1999). Quartz et silice (Recueil 2003 des Econotes de la cellule d'intelligence économique du brgm). *Géochronique n° 69*. Société Géologique de France, Orléans, 7p.
- BSI. (1998). *Methods for Sampling and Analysis of Glass-Making Sands*; BS 2975:1988. London, UK.
- Buhrke, V. E., Jenkins, R., & Smith, D. K. (1997). *A Practical Guide for the Preparation of Specimens for X-Ray Fluorescence and X-Ray Diffraction Analysis*. 1ª edição. New York: John Wiley & Sons, Ltd., USA, 360 p.
- Dias, J. A. (2004). *A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos* [Ebook]. Universidade do Algarve, Faro, 49–52. Disponível em: http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html
- Direção Geral de Energia e Geologia. (2016). *Informação Estatística n°18* (Indústria Extrativa). Lisboa, 16 p.
- USGS (2017). *2015 Minerals Yearbook: Silica [advance release]*. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: Dolley, T., 15 p.
- Duval, J. B. (1958). *Foundry manual - Sands for Molds and Cores*. Washington, D.C: Department of the Navy, Bureau of Ships, 39-61. Disponível em: <https://maritime.org/doc/foundry/index.htm#pg39>

- European glass container Industry. (2016). *Container glass production under the eu-ets reform post-2020: an asset for europe's low-carbon economy*. FEVE, Brussels. Disponível em: http://feve.org/wp-content/uploads/2016/06/FEVE-Position-on-EU-ETS-Reform-post-2020_FINAL180516.pdf
- Filipe, A., Inverno, C., Oliveira, D., Santana, H., Matos, J., Ramos, J., ... Costa, L. (2010). Areias Especiais e Diatomito. *Recursos minerais: o potencial de Portugal*. LNEG, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, 46–47.
- França, J., & Zbyszewski, G. (1963). *Carta Geológica da Portugal na escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha 26-B* (Alcobaça). Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 51 p.
- Carvalho, G. (2006). *Geologia Sedimentar: Volume III - Rochas Sedimentares*. Âncora Editora. Lisboa, 81-87.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 59-63.
- GWPC, & Consulting, A. (2009). *Modern Shale Gas - Development in the United States: A Primer*. Oklahoma, 61-64
- Haynes, W. M. et. al. (2016). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 97ª Edição, CRC press. New York, 4-33.
- Kearey, P., Klepries, K., & Vine, F. (2009). *Global Tectonics*. John Wiley & Sons. 3ª Edição, John Wiley & Sons. pp. 1689-1699. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kullberg, J.C., (2000). Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitaniana (Parte 1). Tese doutoramento, Universidade Nova Lisboa, I.89-I.99.
- Kumar, S. (2009). *Topic 2: Chlor alkali industry, industrial acid, cement, glass & ceramics and pulp & paper*. Disponível em: <https://sites.google.com/a/sdsenthil.com/chemical-technology/glass>
- Medici, T., Lima, A., de Matos, A. P., & Vilarigues, M. (2014). O papel dos materiais geológicos no estudo de proveniência de vidros. Dinis, P., Gomes, A., & Rodrigues, S., *Proveniência de materiais geológicos: abordagens sobre o Quaternário de Portugal*. APEQ, Braga, pp. 243-252. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Teresa_Medici/publication/301202162_O_papel_dos_materiais_geologicos_no_estudo_de_proveniencia_de_vidros/links/570c0e0e08aee0660351ab60.pdf
- Mitchell, C. (2015). Uk Frac Sand Resources. *Proceedings of the 18th Extractive Industry Geology Conference, EIG Conferences Ltd. XXpp*. British Geological Survey, Nottingham, 17 pp. Disponível em: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/509451/1/UK%20Frac%20Sand%20Resources.pdf>
- Moura, A., & Velho, J. (2011). *Recursos Geológicos de Portugal*. 1ª Edição, Palimage, Coimbra. 321-328.
- Nagata, N., Bueno, M. I. M. S., & Peralta-zamora, P. G. (2001). Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementos na análise quantitativa por Fluorescência de Raios-X. *Química Nova - Sociedade Brasileira de Química*, Vol. 24, 531–539.

- Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março. *Diário da República n.º 53/2004, Série I-B de 2004-03-03*. Ministérios da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, da Saúde e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Lisboa.
- Pye, K., & Tsoar, H. (2008). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer Science & Business Media, Berlin, 65-70.
- Ramos, A. M. (2008). *O Pliocénico e o Plistocénico da Plataforma Litoral entre os paralelos do Cabo Mondego e da Nazaré*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 27-49.
- Rasmussen, S. C. (2012). Origins of Glass : Myth and Known History. Em *How Glass Changed the World*. Springer Science & Business Media, 11-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28183-9>
- Rudnick RL and Gao S (2003) Composition of the continental crust. Em: Rudnick RL. *Treatise on Geochemistry*, Vol.3, Elsevier, Oxford 1–64.
- Sampaio, J. A., França, S. C. A., & Braga, P. F. A. (2008). Nefelina Sienito. Em CETEM, *Rochas e Minerais Industriais*, Rio de Janeiro, 664–680.
- Société Générale de Surveillance. (2017). QEMSCAN. Disponível em: <https://www.sgs.pt/en/mining/metallurgy-and-process-design/high-definition-mineralogy/qemscan>
- Shapiro, L., & Brannock, W. W. (1962). Rapid Analysis of Silicate, Carbonate and Phosphate Rocks. *Geological Survey Bulletin 1401*, Washington D10–D13.
- Sharma, B. K. (1991). Glass. *Industrial Chemistry*. Goel. Meerut (Índia) ,591–594.
- Shishkin, S., Dzyuzer, V., & Shishkin, A. (2001). Air Classification of Sands for the Glass Industry. *Glass and Ceramics*, Vol. 58. Springer Nature, 370–373. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1014997923206>
- Sinton, C. W. (2006). *Raw materials for glass and ceramics: sources, processes and quality control*. 1ª Edição, John Wiley & Sons. New York, 356 p.
- Tilley, R. J. D. (2005). *Understanding Solids: The Science of Materials*. 2ª Edição, John Wiley & Sons, 166-168.
- Velho, J. (2011). *Areias Siliciosas de Alhadas (Figueira da Foz): Estudo Mineralógico e Avaliação Geoeconómico*. Aveiro, 19 p.
- Velho, L. (2005). *Mineralogia Industrial - Princípios e Aplicações*. 1ª Edição, Lidel. Coimbra, 592-596.
- Vicente, C. (2015). *Potencial do Sienito Nefelínico de Monchique para incorporação na indústria cerâmica*. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 13-18.

Páginas *on-line* consultadas:

American Foundry Society. Disponível em: <https://www.afsinc.org/>. Consultado em: 1 Janeiro 2018.

Associação Portuguesa de Fundição. Disponível em: www.apf.com. Consultado em: 15 Outubro 2017.

Diário da República. Disponível em: <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/551652/details/>. Consultado em: 1 Março 2018.

Direção Geral de Geologia e Energia (DGEG). Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. Consultado em: 16 Abril 2017.

Federation of European container glass (FEVE). Disponível em: <http://feve.org/>. Consultado em: 5 Maio 2017.

Frac Sand Testing Services. Disponível em: <http://fracsandtesting.com/>. Consultado em: 5 Fevereiro 2018.

Silica and Moulding Sands Association. Disponível em: http://www.samsa.org.uk/silica/did_you_know.php. Consultado em: 28 Outubro 2017. Consultado em: 18 Abril 2017.

Serviços Internacionais de Certificação, Lda (SGS ICS). Disponível em: <http://www.sgs.pt>. Consultado em: 24 Maio 2017.

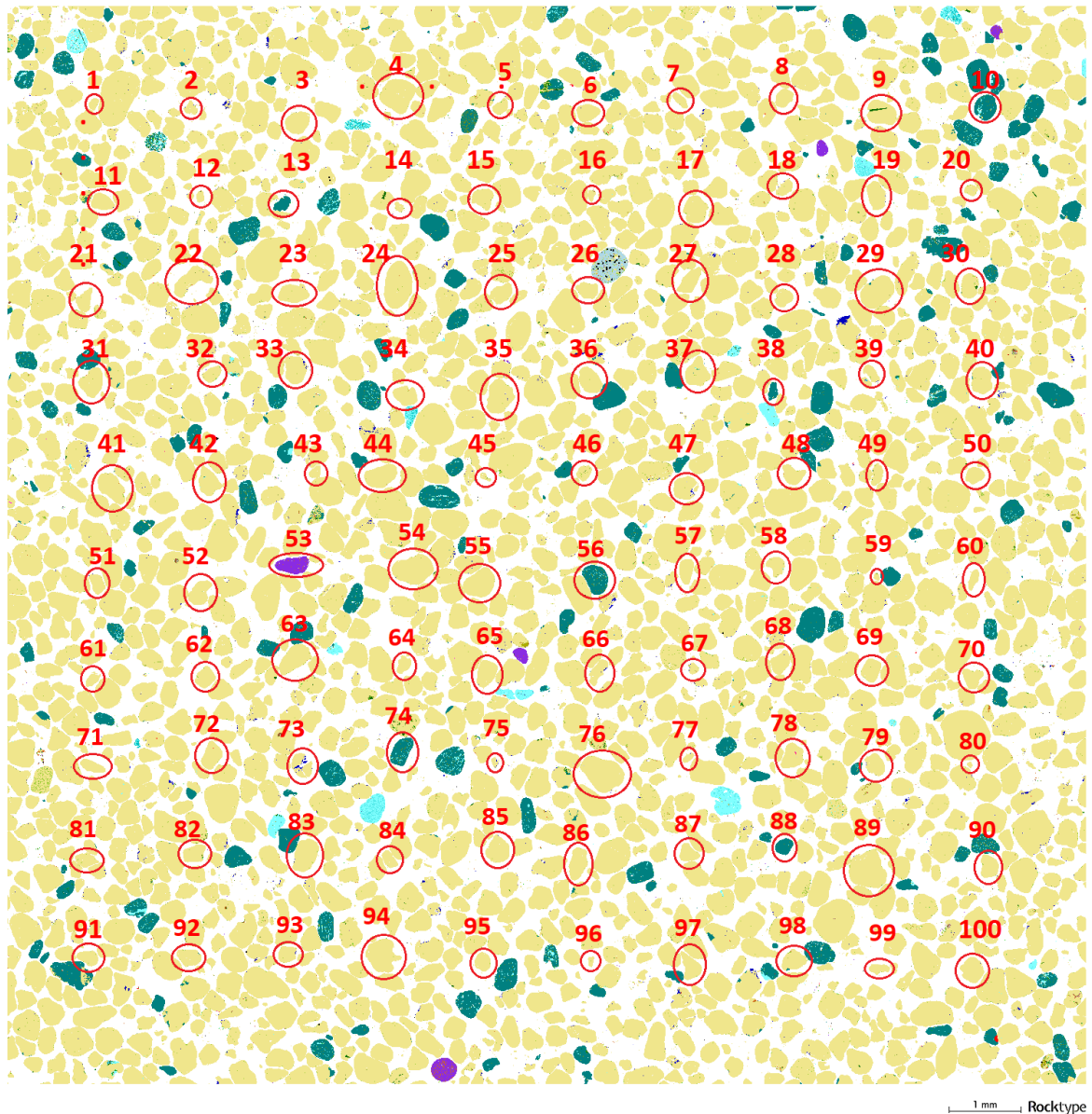
Rocktype Ltd. *QEMSCAN Technology*. Disponível em: <http://rocktype.com/>. Consultado em: 24 Maio 2017.

ANEXOS

Anexo 1 - Análise mineralógica QEMSCAN para 100% dos componentes presentes na amostra analisada.

Mineral	%	Mineral	%
Quartzo	91.785	Ortopiroxenas	0.000
K-Feldspatos	6.007	Clinopiroxenas/Anfibolas	0.002
Albite	0.737	Rutilo/Anátase	0.009
Oligóclase	0.071	Cr-Espinelas	0.000
Andesina/Anortite	0.030	Apatite	0.001
Biotite	0.008	Monazite/Xenótimo	0.000
Moscovite	0.055	Calcite	0.004
Ilite	0.049	Dolomite	0.001
Clorite	0.013	Fe-Dolomite	0.000
Caulinite	0.081	Anquerite	0.000
Glauconite	0.000	Siderite	0.001
Partículas mistas (Quartzo + Argila)	0.539	Fe-Óxidos	0.001
Outras Argilas	0.254	Pirite	0.000
Zircão	0.001	Barite	0.000
Turmalina	0.202	Anidrite/Gesso	0.000
Granadas	0.004	Halite	0.000
Epídoto	0.000	Outras fases	0.015
Titanite	0.000	Não classificados	0.021
Cianite	0.107	TOTAL	100.000
Estaurolite	0.001		

Anexo 2 - Grãos selecionados por uma malha regular para a análise da classe de rolamento da areia.

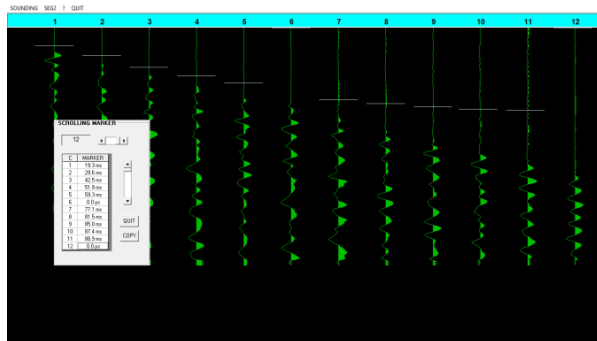


Anexo 3 - Classificação numérica dos 100 grãos selecionados na imagem QEMSCAN para determinação da classe de rolamento para cada grão.

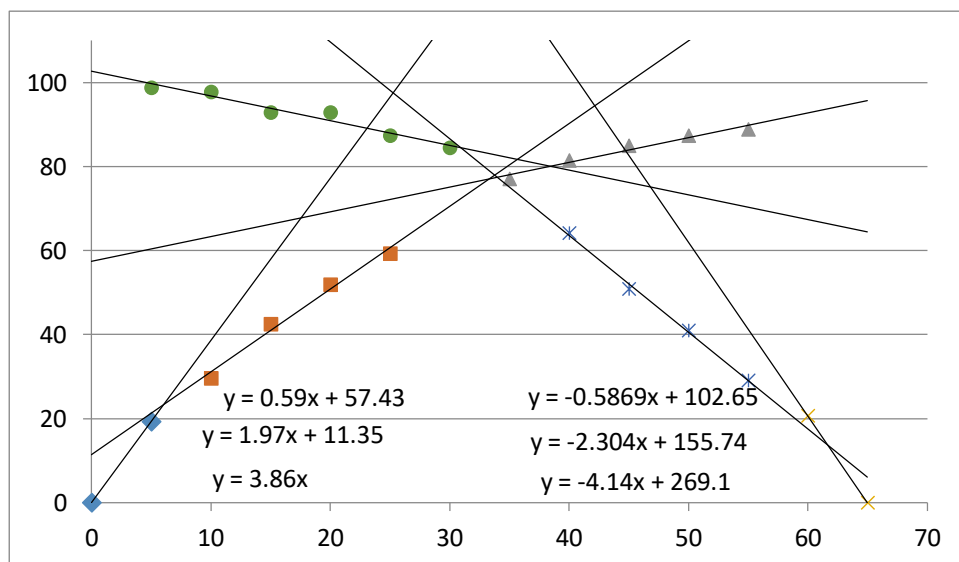
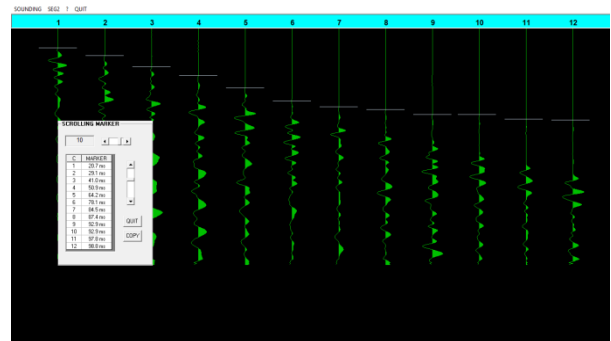
Grão	Classificação	Grão	Classificação	Grão	Classificação	Grão	Classificação
1	4	26	2	51	3	76	4
2	1	27	4	52	2	77	4
3	3	28	2	53	2	78	3
4	3	29	6	54	3	79	3
5	3	30	5	55	5	80	2
6	4	31	3	56	5	81	2
7	2	32	5	57	6	82	3
8	4	33	4	58	3	83	4
9	3	34	3	59	3	84	4
10	5	35	2	60	4	85	2
11	3	36	4	61	2	86	4
12	3	37	3	62	3	87	3
13	1	38	2	63	4	88	4
14	1	39	4	64	2	89	3
15	2	40	5	65	5	90	5
16	3	41	4	66	1	91	4
17	4	42	3	67	3	92	3
18	1	43	2	68	4	93	4
19	4	44	4	69	5	94	2
20	3	45	3	70	3	95	5
21	1	46	3	71	4	96	2
22	2	47	2	72	5	97	2
23	3	48	3	73	1	98	2
24	6	49	1	74	5	99	1
25	3	50	3	75	4	100	2

Anexo 4 - Interpretação de Sismogramas (SismoLPC), dromocrônicas e cálculo de profundidades (h1 e h2).

Tiro 1d

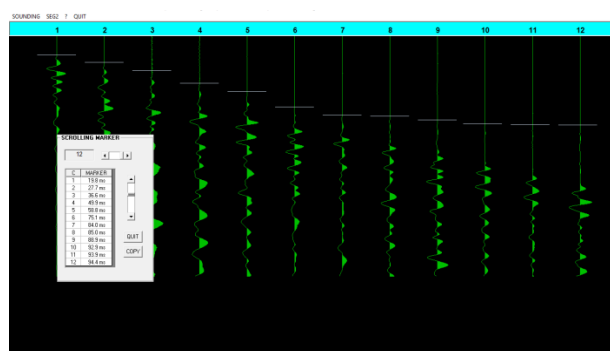


Tiro 1i

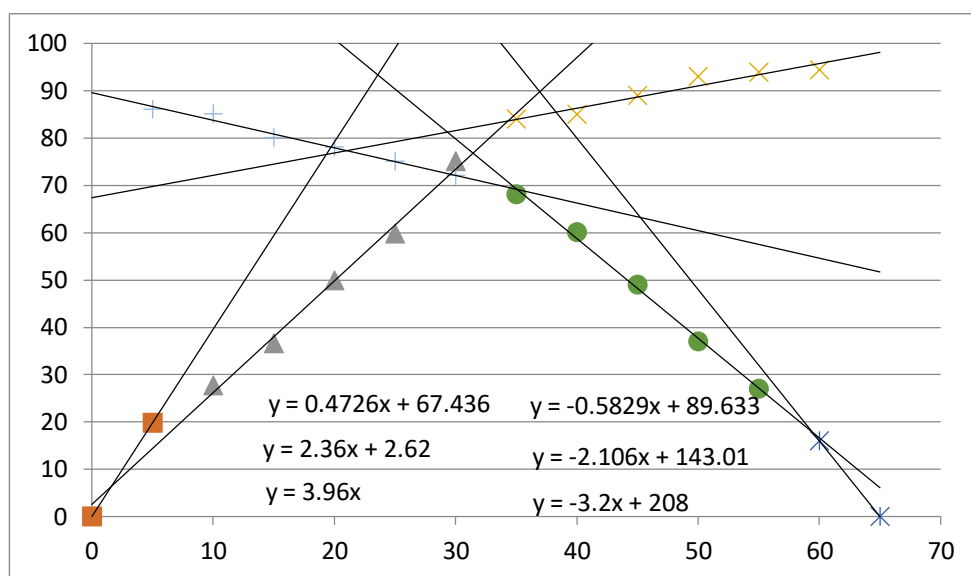
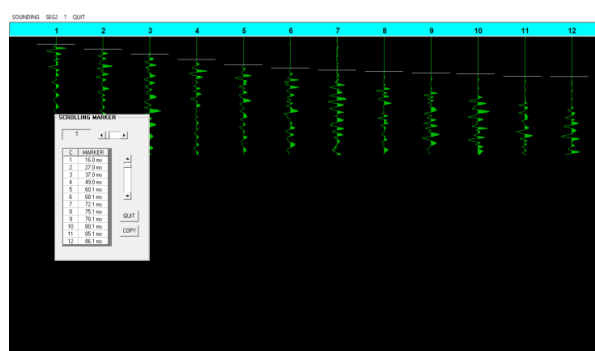


Perfil 1					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade	Xc e X1	h1 e h2	Espessura
1	y = 3.86x	259.0673575	6	1.7	12.45
2	y = 1.97x + 11.35	507.6142132			
3	y = 0.59x + 57.43	1694.915254	33.4	14.15	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade	Xc e X1	h1 e h2	Espessura
1	y = 4.14x	241.5458937	3.3	0.88	12.9
2	y = 2.304x + 5.98	434.0277778			
3	y = 0.5954x + 64.35	1679.543164	34	13.78	

Tiro 2d

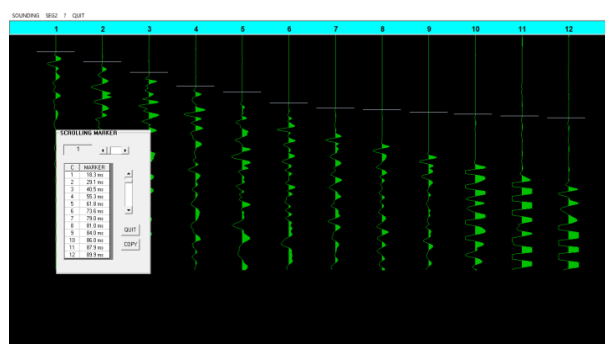


Tiro 2i

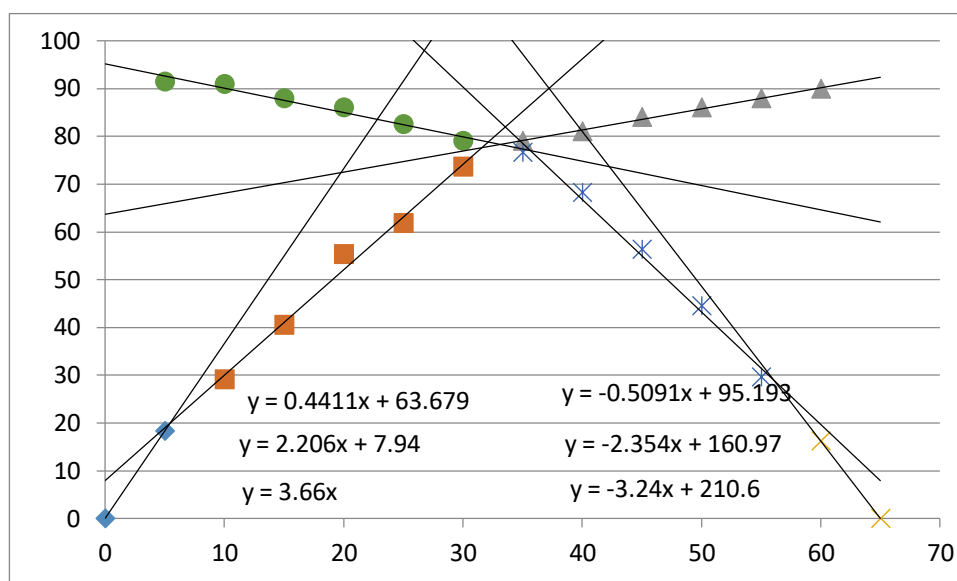
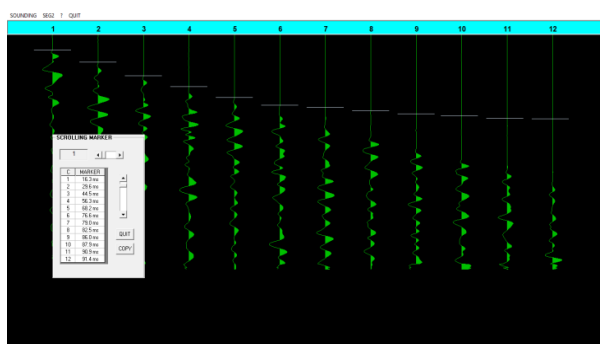


Perfil 2					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y1 =3.96x	252.53	Xc= 1.64	h1 = 0.41	h2-h1
2	y2 = 2.36x+2.62	423.73			13.95
3	y3 = 0.4726x+67.436	2115.95	X1= 34.34	h2 =14.36	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y1 = -3.2x + 208	312.50	Xc = 5.59	h1 = 1.26	h2-h1
2	y2 = -2.106x + 143.01	474.83			11.07
3	y3 = -0.5829x +89.633	1715.56	x1 = 29.95	h2 = 12.33	

Tiro 3d

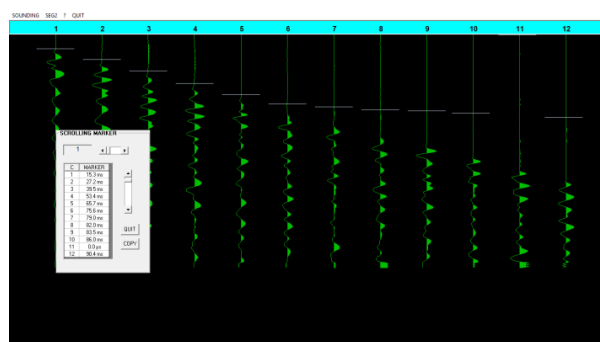


Tiro 3i

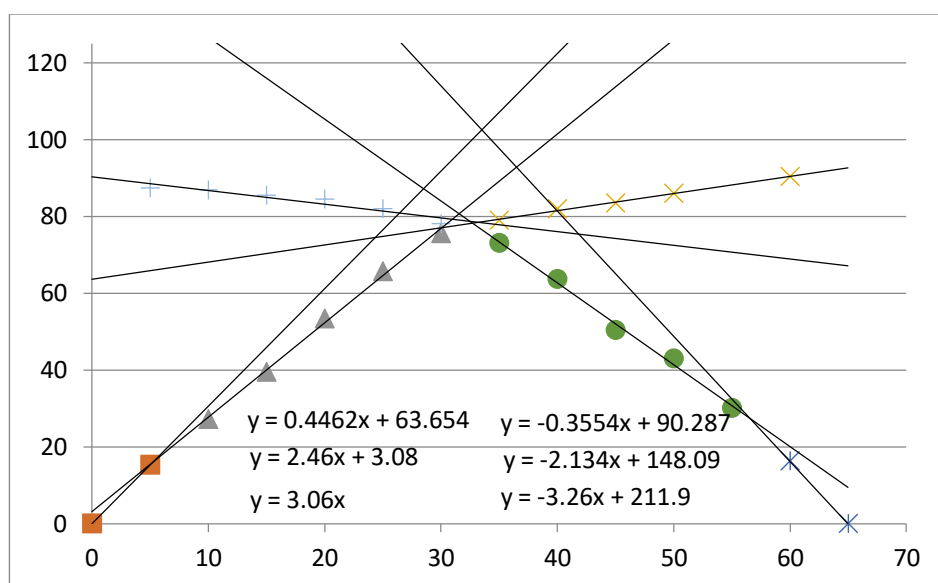
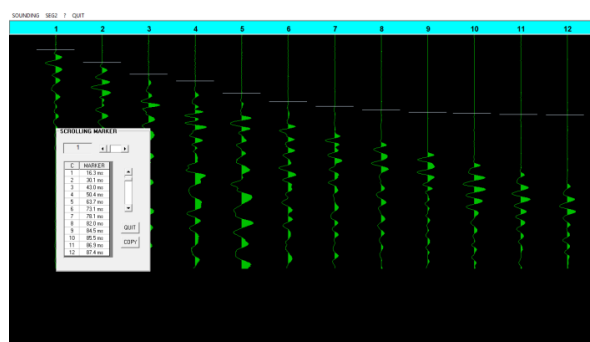


Perfil 3					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.66x	273.2240437	5.46	1.36	12.67
2	y = 2.206x + 7.94	453.3091568			
3	y = 0.4411x + 63.679	2267.059624	31.58	14.03	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -3.24x + 210.6	308.6419753	8.97	1.78	11.49
2	y = -2.354x + 160.97	424.808836			
3	y = -0.5091x + 95.193	1964.250638	29.35	13.27	

Tiro 4d

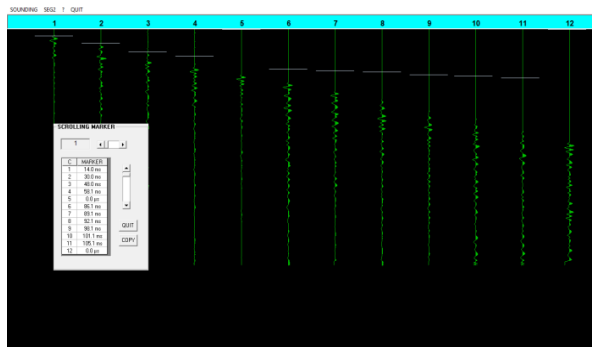


Tiro 4i

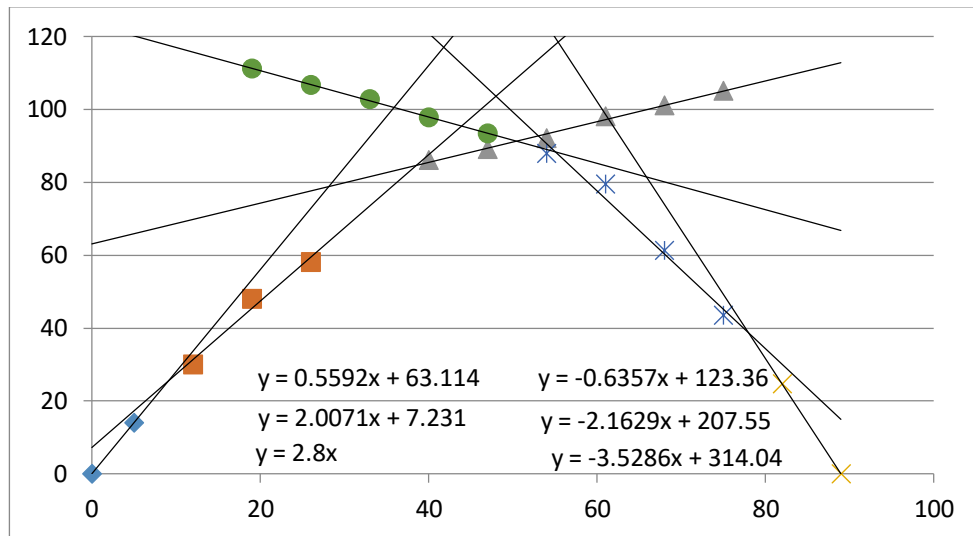
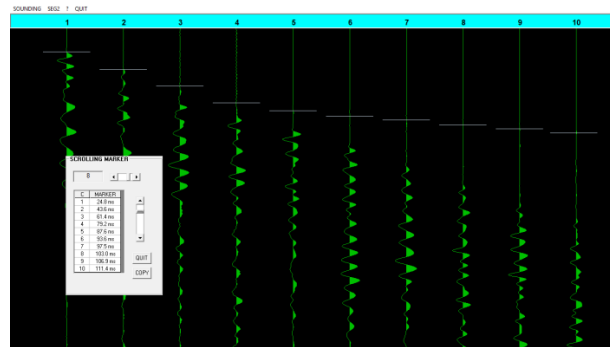


Perfil 4					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.06x	326.7973856	5.13	0.8	12.3
2	y = 2.46x + 3.08	406.504065			
3	y = 0.4462x + 63.654	2241.147468	30.1	13.2	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -3.26x + 211.9	306.7484663	8.33	1.9	13.4
2	y = -2.134x + 148.09	468.6035614			
3	y = -0.3554x + 90.287	2813.731007	32.5	15.3	

Tiro 5d

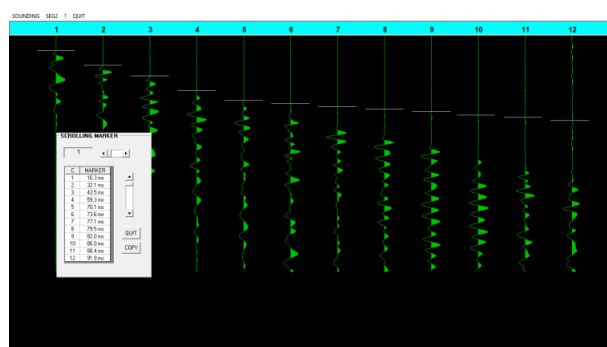


Tiro 5i

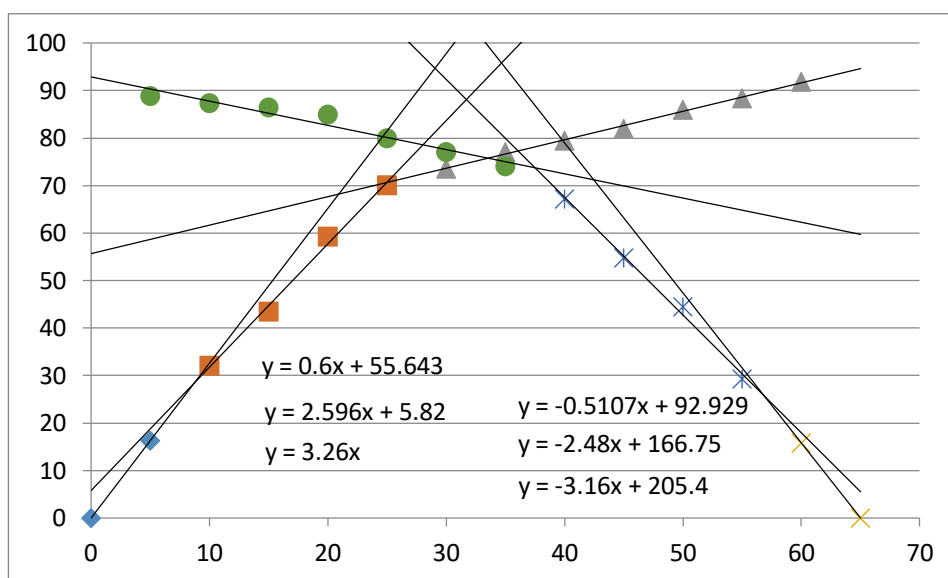
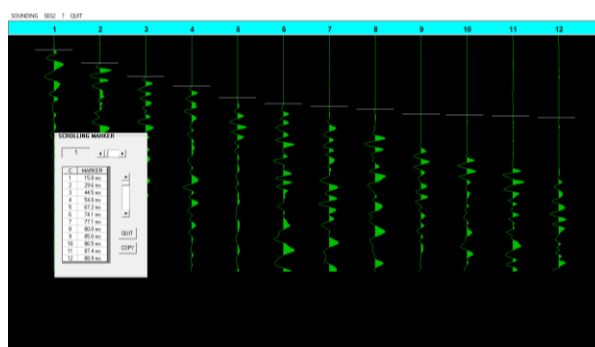


Perfil 5					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 2.8x	357.1428571	9.12	1.8	14.9
2	y = 2.0071x + 7.231	498.231279			
3	y = 0.5592x + 63.114	1788.268956	38.6	16.7	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -3.5286x + 314.04	283.398515	11.03	2.7	12.4
2	y = -2.1629x + 207.55	462.3422257			
3	y = -0.6357x + 123.36	1573.069058	34.24	15.1	

Tiro 6d

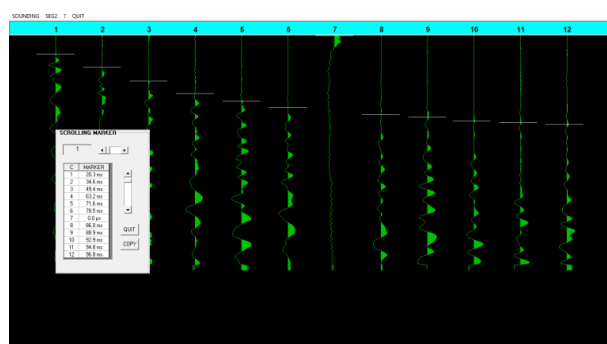


Tiro 6i

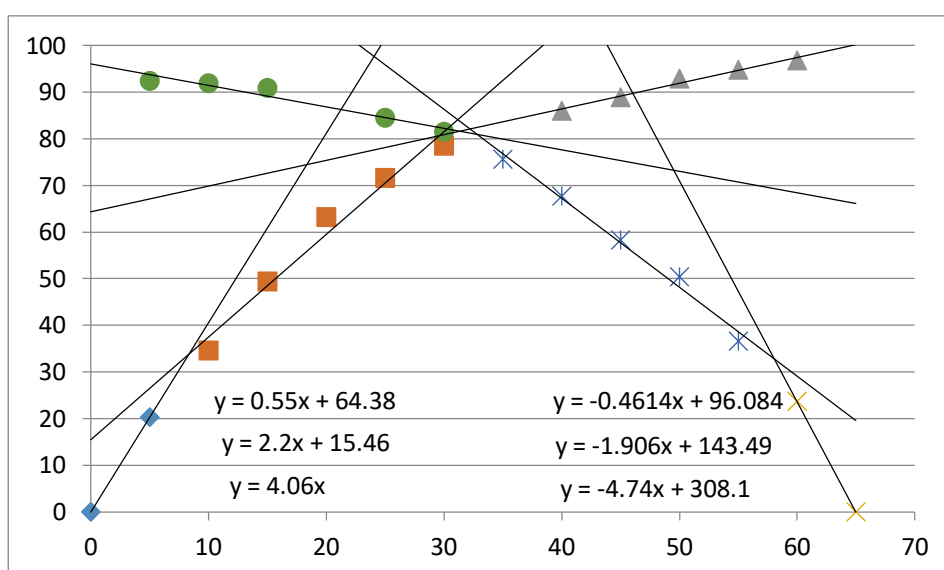
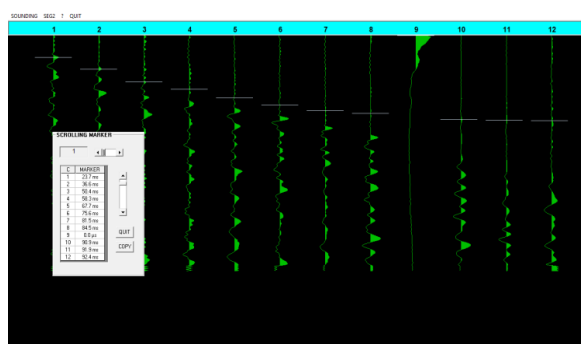


Perfil 6					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.26x	306.7484663	8.77	1.5	9.6
2	y = 2.596x + 5.82	385.2080123			
3	y = 0.6x + 55.643	1666.666667	24.96	11.1	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.16x	316.4556962	8.16	1.4	11.5
2	y = 2.48x + 5.55	403.2258065			
3	y = 0.5107x + 59.73	1958.09673	27.51	12.9	

Tiro 7d

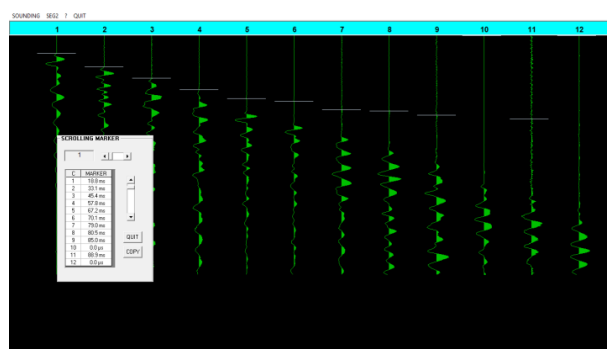


Tiro 7i

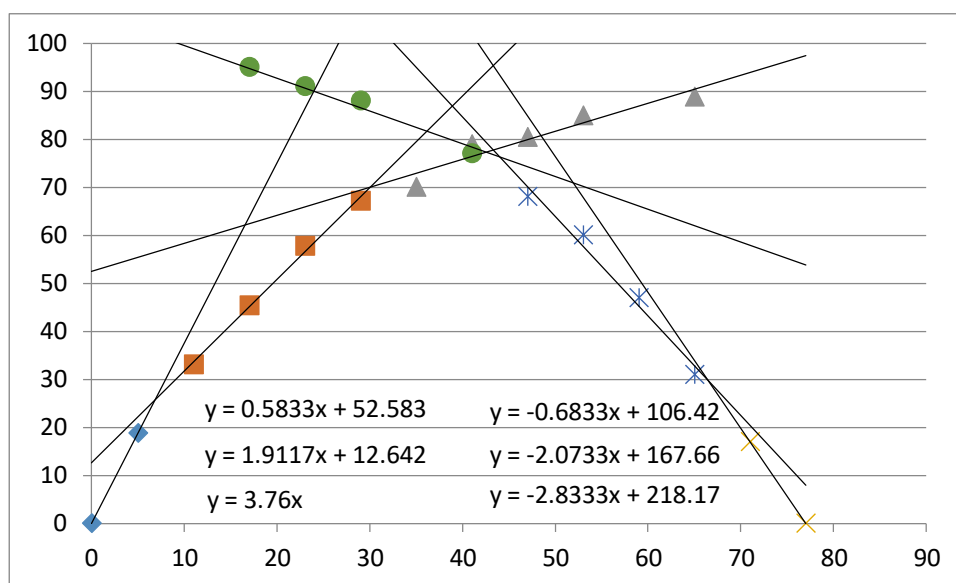
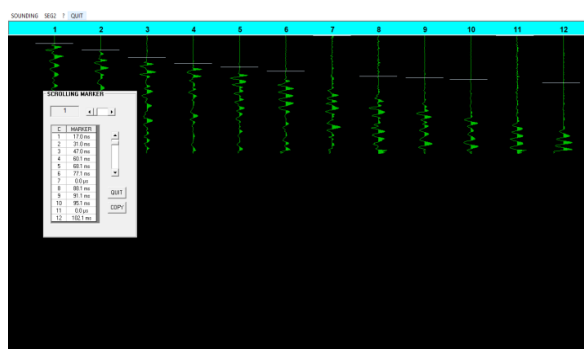


Perfil 7					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 4.06x	246.3054187	8.31	2.3	11.1
2	y = 2.2x + 15.46	454.5454545			
3	y = 0.55x + 64.38	1818.181818	29.65	13.4	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -4.74x + 308.1	210.9704641	6.92	2.3	12.2
2	y = -1.906x + 143.49	524.6589717			
3	y = -0.4614x + 96.084	2167.316862	32.18	14.5	

Tiro 8d

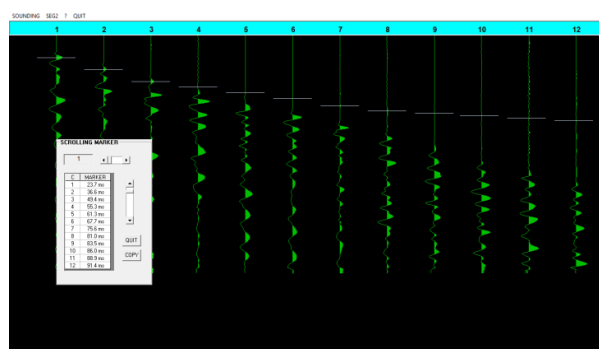


Tiro 8i

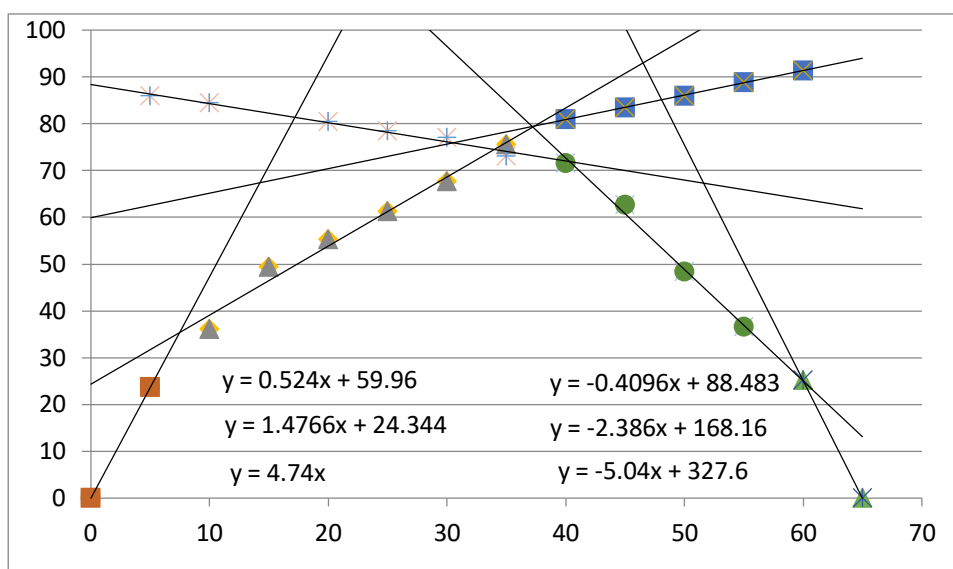
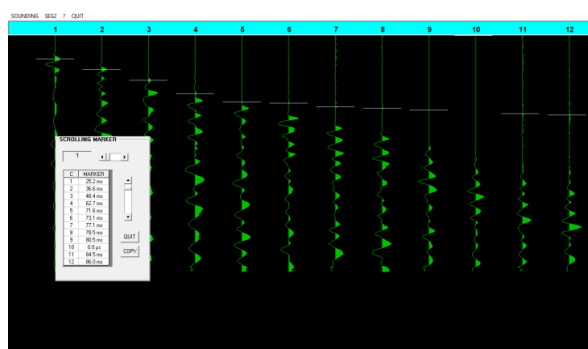


Perfil 8					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.76x	265.9574468	6.84	1.9	10.7
2	y = 1.9117x + 12.642	523.0946278			
3	y = 0.5833x + 52.583	1714.383679	30.07	12.6	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -2.8333x + 218.17	352.9453288	10.53	2.1	11.3
2	y = -2.0733x + 167.66	482.3228669			
3	y = -0.6833x + 106.42	1463.486024	32.94	13.4	

Tiro 9d

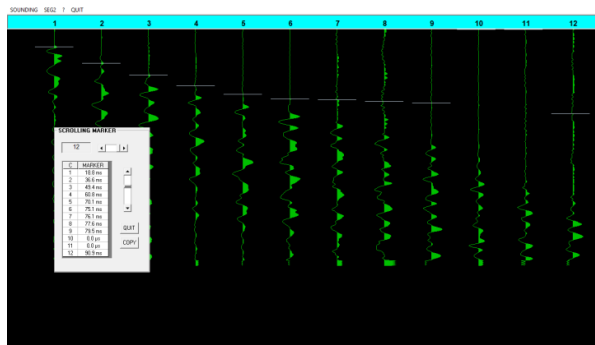


Tiro 9i

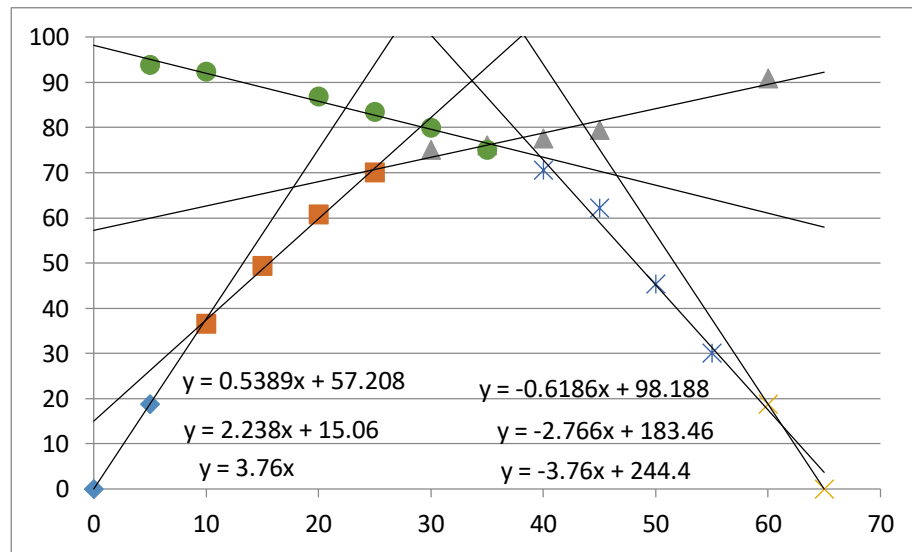
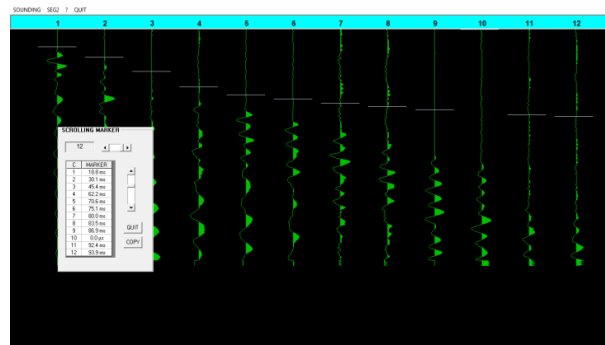


Perfil 9					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 4.74x	210.9704641	7.46	2.7	12.45
2	y = 1.4766x + 24.344	677.2314777			
3	y = 0.524x + 59.96	1908.396947	37.39	15.15	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -5.04x + 327.6	198.4126984	4.92	1.47	10.14
2	y = -2.386x + 168.16	419.1114837			
3	y = -0.4096x + 88.483	2441.40625	24.69	11.61	

Tiro 10d

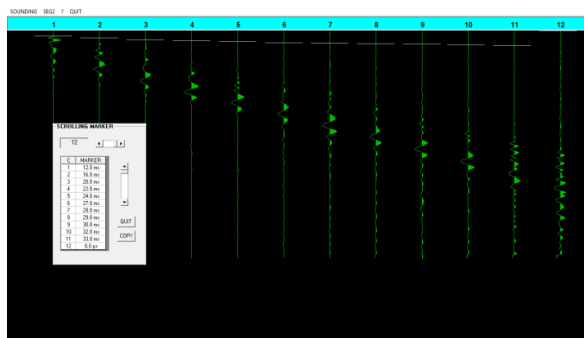


Tiro 10i

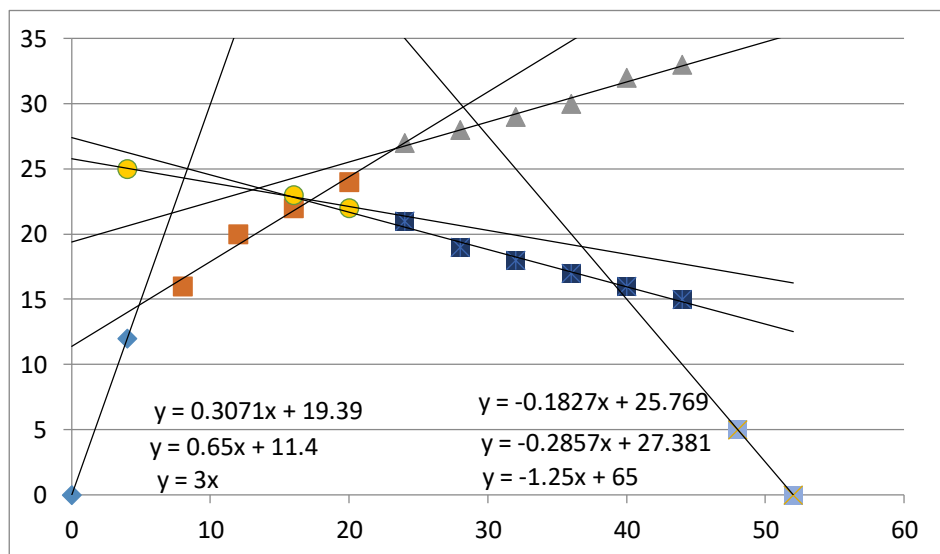
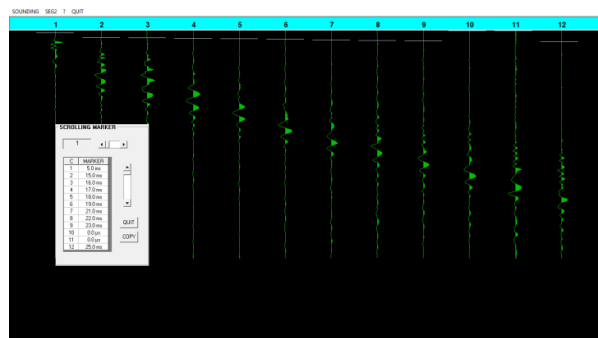


Perfil 10					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3.76x	265.9574468	9.89	2.5	9.6
2	y = 2.238x + 15.06	446.8275246			
3	y = 0.5389x + 57.208	1855.631843	25.56	12.1	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = -3.76x + 244.4	265.9574468	3.69	0.7	10.0
2	y = -2.766x + 183.46	361.5328995			
3	y = -0.6186x + 98.188	1616.553508	25.29	10.7	

Tiro 11d



Tiro 11i



Perfil 11					
Tiro Direto					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 3x	333.3333333	4.85	1.9	6.7
2	y = 0.65x + 11.4	1538.461538			
3	y = 0.3071x + 19.39	3256.268317	23.3	8.6	
Tiro Inverso					
Dromocrónica	Equação	Velocidade (m/s)	Xc e X1 (m)	h1 e h2 (m)	Espessura (m)
1	y = 1.25x	800	17.13	6.4	7.7
2	y = 0.2857x + 12.238	3500.175009			
3	y = 0.1827x + 16.087	5473.453749	37.37	14.1	

Anexo 5 - Tabela das velocidades dos meios obtidas em cada perfil - resultantes da média: tiro direto e inverso

Meio	Perfis	Velocidades	Velocidades. médias
1 (solo arenoso)	1	250	287
	2	283	
	3	291	
	4	317	
	5	320	
	6	312	
	7	318	
	8	309	
	9	205	
	10	266	
2 (areia siliciosa)	1	471	462
	2	449	
	3	439	
	4	438	
	5	480	
	6	394	
	7	490	
	8	503	
	9	548	
	10	404	
3 (Areia argilosa alaranjada)	1	1687	1885
	2	1916	
	3	2116	
	4	2527	
	5	1720	
	6	1812	
	7	1993	
	8	1589	
	9	2175	
	10	1736	
	11	1269	
4 (Arenito/Margas) (?)	11	3378	
5 (Margas: hetangiano) (?)		5473	